

# Sensibilidad de la parametrización de la convección utilizando WRF-ARW, sobre la Sierra Norte del Perú

Autor: Jorge Armando Ordoñez Piscoya

Supervisor: Bernat Codina Sánchez, bcodina@ub.edu

*Facultat de Física, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona, Spain\*.*

**Resumen:** En la Sierra Norte del Perú, durante el periodo de precipitaciones pueden producirse eventos extremos, tales como lluvias excesivas o déficit de lluvias, que en ciertas ocasiones ha generado desastres en esta zona. Muchas instituciones en el mundo realizan los pronósticos de la precipitación utilizando modelos numéricos meteorológicos como el WRF. En este trabajo se ha realizado una verificación de los pronósticos producidos con el modelo, en varios casos de precipitación observados sobre esta región. Se ha hecho un estudio de la sensibilidad del modelo a la parametrización de la convección y al paso de malla, utilizando algunas de las opciones que ofrece el modelo WRF. Se ha comparado los valores de precipitación simulados, con los medidos en estaciones pluviométricas convencionales y automáticas. Se muestran los resultados de esta verificación sobre dos configuraciones de dominios; la primera, una cascada de simulación de 45 km, 15 km y 5 km y una segunda cascada de simulación de 27 km, 9 km y 3 km. Con estas configuraciones se ha llegado a la conclusión que la que más acierta los pronósticos, es la que combina el esquema de microfísica de nubes WSM6 con la parametrización convectiva de Grell G3. Asimismo, de las dos configuraciones de dominios la que más acierta es la cascada de simulación de 27 km, 9 km y 3 km.

## 1 Introducción

En los Andes del Perú, el régimen de lluvias es producto de las tormentas convectivas profundas que se desarrollan sobre la cordillera (Garreaud, 2009). En el verano austral, el ligero debilitamiento del anticiclón del sureste del Pacífico y el desplazamiento hacia el sur de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) permite el desarrollo de una temporada lluviosa (Lavado et al., 2012). En el norte de Perú la precipitación es más concentrada durante el otoño austral, cuando la ZCIT alcanza su posición más al sur (Garreaud, 2009). La variabilidad interanual que se observa en esta región puede estar asociada con eventos extremos, de déficit o exceso de precipitaciones, así como con eventos como El Niño (Saavedra, 2016; Lagos et al., 2008).

El periodo de precipitaciones, en la Sierra Norte se inicia en setiembre y finaliza en abril (Saavedra, 2016). En muchas ocasiones estas precipitaciones han producido inundaciones que se han traducido en daños materiales e incluso pérdida de vidas humanas.

Dada la importancia de los pronósticos de la precipitación, algunas instituciones nacionales del Perú, como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y otras comunidades de usuarios en el mundo, utilizan modelos meteorológicos de pronóstico como el WRF (Weather Research and Forecasting) para realizar la predicción de lluvias.

El modelo WRF, es un modelo numérico de mesoescala de código abierto, desarrollado por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) en colaboración con otras organizaciones. Este modelo es utilizado tanto para el pronóstico del tiempo como para fines de investigación, gozando de una gran popularidad entre sus usuarios. En el modelo WRF como en otros modelos meteorológicos, los procesos que por diversas razones no pueden ser resueltos directamente por las propias ecuaciones primitivas y que son necesarias para describir el comportamiento de la atmósfera deben ser parametrizados.

Las dos parametrizaciones más directamente relacionadas con la precipitación son: la convección y la microfísica de

nubes. La convección es la responsable del ascenso de masas de aire que acaban formando las nubes. Mientras que, la microfísica de nubes controla la formación y crecimiento de las gotitas nubosas que dan lugar a la precipitación.

En este trabajo, se estudia la sensibilidad del modelo WRF a la parametrización de la convección, utilizando el esquema de microfísica de nubes WSM6 (WRF Single Moment 6 class) con algunas opciones para la parametrización de la convección. Dentro de estas opciones se han usado los esquemas Kain-Fritsch, Grell G3 y la opción que desactiva esta parametrización. El objetivo, fue comparar los resultados obtenidos de las simulaciones, con los datos de estaciones meteorológicas en superficie, para encontrar la mejor combinación para pronosticar la lluvia en la zona de interés. Se ha hecho esta comparación para cinco eventos, ocurridos entre febrero y marzo del 2017, donde se han registrado valores importantes de precipitación (Tabla 1).

Los datos pluviométricos utilizados en este trabajo, son datos de precipitación que provienen de la red de estaciones del SENAMHI y que están distribuidas en la Sierra Norte del país (Figura 1). Se han utilizado datos de precipitación de un total de 29 estaciones convencionales (manuales) y 18 estaciones automáticas (Anexo 01). Las estaciones convencionales registran los datos pluviométricos dos veces al día; a las 7:00 a.m. (12:00 UTC) y 19:00 p.m. (00:00 UTC). Mientras que las estaciones automáticas registran la precipitación cada hora.

Dentro de algunos estudios similares en los que se ha evaluado la sensibilidad de la parametrización de la convección utilizando el modelo WRF, se puede citar J. Mercader et al. (2010) para el ámbito de Cataluña, que encuentra que la combinación del esquema convectivo de Kain-Fritsch con el esquema microfísica WSM5, proporciona mejores resultados en el pronóstico de precipitación convectiva. Zheng et al. (2016) para el ámbito las Grandes Llanuras del Sur de USA, encuentra que el esquema de Kain-Fritsch actualizado de estos autores, proporciona mejores pronósticos para la ubicación e intensidad de la precipitación. Kain et al. (2006) también para el ámbito de USA, opta por un tratamiento explícito de la convección. Uribe (2012) para el ámbito de la región Andina Colombiana, utilizando el esquema

---

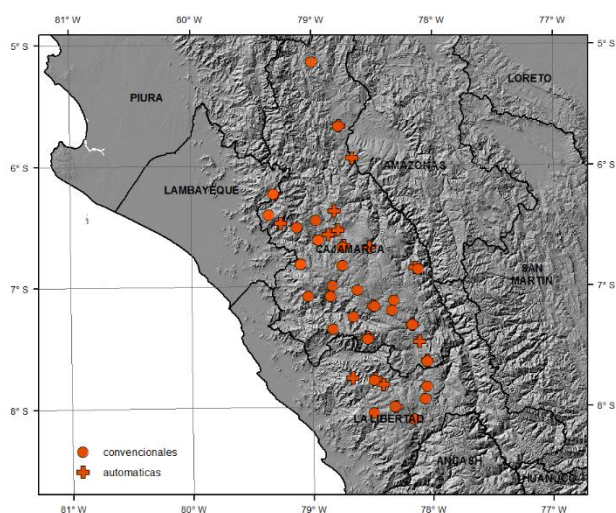
\* Electronic address: jorge.ordonez.pis@outlook.com

convectivo de Kain-Fritsch y de microfísica de Morrison, simula eventos extremos de precipitación en esa zona. En el Perú Junquas et al. (2017) utiliza el modelo WRF, para estudiar el efecto de la orografía en el ciclo diurno de la precipitación en los Andes centrales. Específicamente para la zona de estudio Saavedra (2016) valida el modelo WRF, concluyendo que el modelo logra captar la estacionalidad marcada de la precipitación con condiciones secas durante agosto y las lluviosas en marzo, pero no realiza ninguna prueba de sensibilidad a la parametrización de la convección y microfísica de nubes.

**Tabla 1.** Lista de los eventos estudiados con el número de simulaciones hechas, que corresponden a las configuraciones probadas (combinación de 3 opciones para la parametrización de la convección para cada dominio configurado).

Eventos o casos de estudio año/mes/día	Número de simulaciones
2017/02/08	18
2017/02/10	18
2017/03/09	18
2017/03/14	18
2017/03/31	18
TOTAL	90

En la siguiente sección se hace una descripción de las configuraciones utilizadas para las simulaciones hechas con el modelo WRF. En la sección 3 se explica la metodología seguida para realizar la verificación y en la sección 4 se exponen los resultados y se realiza una evaluación de ellos. La última sección escrita de este trabajo está dedicada a las conclusiones.



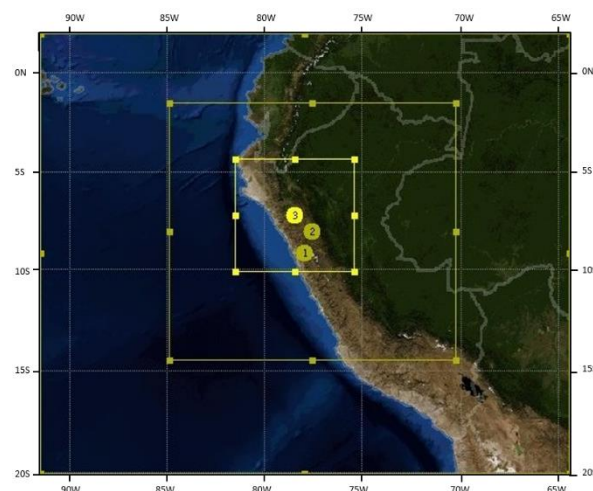
**Figura 1.** Pluviómetros utilizados en este estudio y que son parte de la red de estaciones convencionales y automáticas del SENAMHI

## 2 Diseño de las Simulaciones.

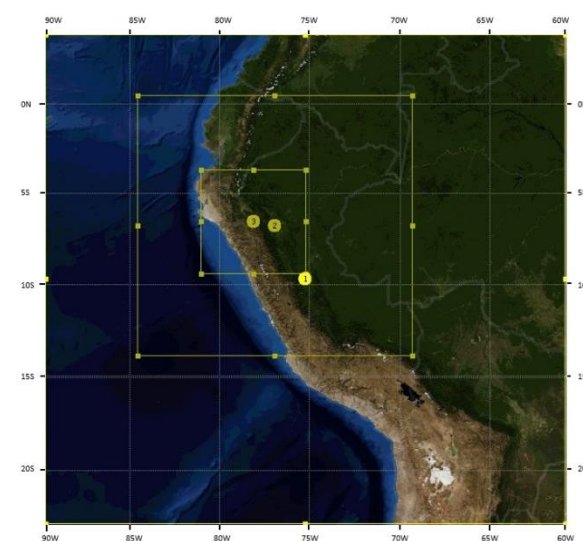
### 2.1 Configuración de Dominios.

Para realizar este trabajo se ha creído conveniente hacer dos configuraciones de dominios que incluyen dominios

anidados. La primera configuración corresponde a un dominio externo con paso de malla de 27 km y con dominios anidados 9 km y 3 km (Figura 2). La segunda configuración, corresponde a un dominio externo con paso de malla de 45 km, con anidamientos de 15 km y 5 km (Figura 3). Para todas las mallas definidas se ha utilizado el conjunto de 28 niveles verticales, número de niveles que son los que por defecto tiene definido el modelo WRF (Wang et al, 2012).



**Figura 2.** Dominio de 27 km de paso de malla, con anidamientos de 9 km y 3 km.



**Figura 3.** Dominio de 45 km de paso de malla, con anidamientos de 15 km y 5 km.

### 2.2 Condiciones iniciales y de contorno

Se ha usado como condiciones iniciales y de contorno para los dominios externos de ambas configuraciones, los datos de re-análisis de ERA-Interim (0.75° x 0.75° de resolución horizontal). El horizonte de pronóstico ha sido siempre de 24 horas y se ha inicializado 6 horas antes, cada simulación. Esto se ha hecho con el fin de darle tiempo al modelo para que se estabilicen los campos meteorológicos (spin up) y que el modelo pueda eliminar o filtrar las ondas gravitatorias. Para los dominios anidados, se ha utilizado las condiciones de contorno proveídas desde el dominio más externo (Tabla 2).

**Tabla 2.** Características de los dominios externos y anidados.

	Dominio externo	Dominio anidado	Dominio anidado
Paso de malla	27 km	9 km	3 km
Tamaño (X,Y,Z)	108,90,28	175,157,28	217,205,28
Paso de tiempo	120s	60s	30s
Condiciones iniciales	ERA-Interim (0.75° x 0.75°)		
Condiciones de contorno	ERA-Interim (0.75° x 0.75°)	WRF dominio externo	WRF dominio externo
Paso de malla	45 km	15 km	5 km
Tamaño (X,Y,Z)	70,66,38	109,103,38	124,124,38
Paso de tiempo	180s	60s	20s
Condiciones iniciales	ERA-Interim (0.75° x 0.75°)		
Condiciones de contorno	ERA-Interim (0.75° x 0.75°)	WRF dominio externo	WRF dominio externo

### 2.3 Configuración de las parametrizaciones físicas

Se ha mantenido fijas alguna parametrizaciones que vienen configuradas por defecto en el WRF, se ha escogido en cada simulación siempre las parametrización de microfísica de nubes WSM6. Dentro de las que se han mantenido fijas en todas las simulaciones que se han realizado, podemos mencionar la parametrización de radiación de onda larga y corta, capa superficial, subsuelo y capa límite (Tabla 3).

Para el caso de la parametrización de la convección se ha utilizado tres opciones; el esquema Kain-Fritsch, el esquema Grell G3 y una opción desactivando esta parametrización.

**Tabla 3.** Parametrizaciones utilizadas

Parametrización variable	Parametrizaciones fijas
Convección:	Microfísica :
-Kain Fritsch	-Esquema WSM6
-Grell G3	Radiación de Onda Larga:
-Desactivada esta opción	-Esquema RRTG
	Radiación de Onda Corta:
	-Esquema Dudhia
	Capa Superficial:
	-MM5 Monin-Obukhov
	Capa Limite:
	-Esquema YSU

Con la parametrización de la convección variable, se tiene tres configuraciones posibles para cada dominio y como cada evento tiene 6 dominios definidos, en total para cada evento se tiene 18 simulaciones posibles.

### 3 Método de Verificación.

La verificación se realiza comparando el valor simulado y el observado. En este trabajo, el valor simulado se ha tomado como una primera aproximación el valor del punto de malla, más cercano a la estación de observación. La verificación de la precipitación se ha hecho utilizando algunos métodos descritos por Ebert (2008). Se ha utilizado el método llamado verificación categórica. Para este método, el pronóstico de un evento categórico puede expresarse como la ocurrencia o no del evento, pero también como de la superación un umbral significativo. Se calculan algunos índices estadísticos y se construye algunas tablas de contingencia. Se debe mencionar que en este trabajo la verificación se ha realizado comparando con los datos de observaciones de estaciones convencionales o automáticas por separado. La razón de esto, es porque al

solicitar los datos, se nos fue comunicado que los datos de observación de las estaciones automáticas no habían sido validados. Por lo cual se ha creído conveniente, darle mayor credibilidad a los datos de las estaciones convencionales.

**Tabla 4.** Elementos de una tabla de contingencia, para verificación de la precipitación.

		Observación		Total Pronóstico
		SI	NO	
Pronóstico	SI	A	B	A+B
	NO	C	D	C+D
Total Observación		A+C	B+D	N=A+B+C+D

Donde A, B, C y D son el número de ocurrencias de cada verificación individual. De ellos se obtienen diferentes índices como POD, FAR, FBI y CSI, que se calculan, siguiendo las especificaciones dadas por Ebert (2008) y que se muestran en la Tabla 5,

**Tabla 5.** Índices de verificación categóricos.

Índice de Verificación	Formulación
Probabilidad de Detección (POD)	=A/(A+C)
Falsa Alarma (FAR)	=B/(B+C)
Frecuencia BIAS (FBI)	=(A+B)/(A+C)
Índice Crítico de Éxito (CSI)	=A/(A+B+C)

En este trabajo se fijaron umbrales de precipitación (3mm/24h, 10 mm/24h, 20 mm/24h, etc.), con los que construyeron las tablas de contingencia para todas las simulaciones realizadas. Algunos resultados se muestran en la siguiente sección.

### 4 Resultados

#### 4.1 Configuración de dominios con paso de malla (27 km, 9 km y 3 km).

El análisis de los resultados se hizo observando los valores que se obtuvieron en los índices POD, FAR y CSI. Se exponen los resultados teniendo en cuenta todos los eventos analizados (Tabla 6, 7, 8 y 9). Este análisis se hace para cada

**Tabla 6.** Tabla de índices categóricos, calculados para umbrales de 3 mm/24h, 10 mm/24h y 20 mm/24h, utilizando observaciones de estaciones convencionales. Los valores más significativos de CSI, POD y FAR están puestos en negrita.

	3 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	0.86	<b>0.70</b>	<b>0.54</b>	0.92	<b>0.90</b>	<b>0.76</b>	<b>0.08</b>	0.24	0.44
KF-WSM6	<b>0.88</b>	0.68	0.43	<b>0.95</b>	0.83	0.64	0.09	<b>0.21</b>	0.44
Ning-WSM6	0.76	0.59	0.40	0.84	0.71	0.58	0.12	0.24	<b>0.38</b>
	9 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	0.85	<b>0.71</b>	0.43	0.94	<b>0.87</b>	0.68	0.10	0.21	0.51
KF-WSM6	<b>0.89</b>	0.68	<b>0.45</b>	<b>0.98</b>	<b>0.87</b>	<b>0.76</b>	<b>0.09</b>	0.25	0.45
Ning-WSM6	0.72	0.58	0.44	0.78	0.69	0.62	<b>0.09</b>	<b>0.20</b>	<b>0.36</b>
	27 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	<b>0.88</b>	<b>0.64</b>	<b>0.48</b>	0.96	<b>0.86</b>	<b>0.79</b>	<b>0.09</b>	<b>0.27</b>	<b>0.45</b>
KF-WSM6	0.86	0.62	0.43	<b>0.98</b>	0.81	0.69	0.12	0.29	<b>0.45</b>
Ning-WSM6	0.71	0.47	0.36	0.79	0.61	0.57	0.10	0.35	0.47

**Tabla 7.** Tabla de índices categóricos, calculados para umbrales de 3 mm/24h, 10 mm/24h y 20 mm/24h, utilizando observaciones de estaciones automáticas. Los valores más significativos de CSI, POD y FAR están puestos en negrita.

	3 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	0.66	<b>0.48</b>	<b>0.25</b>	0.93	<b>0.86</b>	<b>0.58</b>	<b>0.29</b>	0.47	<b>0.70</b>
KF-WSM6	<b>0.68</b>	0.45	0.20	<b>0.95</b>	0.75	0.53	<b>0.29</b>	<b>0.42</b>	<b>0.70</b>
Ning-WSM6	0.58	0.40	0.21	0.80	0.70	0.48	0.31	0.47	0.74
	9 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	0.636	<b>0.47</b>	<b>0.25</b>	0.89	<b>0.80</b>	0.53	0.31	<b>0.42</b>	0.71
KF-WSM6	<b>0.668</b>	0.39	0.23	<b>0.95</b>	0.70	<b>0.60</b>	<b>0.30</b>	0.50	0.62
Ning-WSM6	0.498	0.33	0.22	0.67	0.51	0.48	0.31	0.46	<b>0.60</b>
	27 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	0.67	<b>0.44</b>	<b>0.29</b>	0.92	<b>0.79</b>	<b>0.65</b>	0.28	<b>0.45</b>	0.63
KF-WSM6	<b>0.68</b>	0.37	0.22	<b>0.95</b>	0.65	0.60	0.29	0.48	0.76
Ning-WSM6	0.58	0.31	0.16	0.76	0.55	0.48	<b>0.24</b>	0.53	<b>0.61</b>

dominio individual y por ejemplo se tiene que, para el dominio más externo con paso de malla de 27 km, utilizando estaciones convencionales, los mejores resultados para el pronóstico de la precipitación, resultan de la combinación del esquema de microfísica de nubes WSM6 con la parametrización de la convección donde se utiliza el esquema Grell G3 (Tabla 6). La misma combinación resulta al comparar los índices obtenidos utilizando estaciones automáticas (Tabla 7).

Para el dominio con paso de malla de 9 km, utilizando estaciones convencionales, se ha obtenido que la mejor combinación, resulta al combinar la microfísica de nubes WSM6 con la parametrización de la convección donde se utiliza el esquema Kain-Fritsch. Para el caso de las estaciones automáticas, resultan igual de buenas tanto las combinaciones de la microfísica de nubes WSM6, con los esquemas Grell G3 o Kain-Fritsch. Los índices muestran resultados muy parecidos para ambos esquemas.

Para el dominio con paso de malla de 3 km, tanto si se usan estaciones convencionales o automáticas, los mejores resultados se obtienen de la combinación de microfísica de nubes WSM6 con la parametrización de la convección donde se utiliza el esquema Grell G3 (Tabla 6 y 7).

#### 4.2 Configuración de dominios con paso de malla (45 km, 15 km y 5 km).

Para esta configuración de han usado los mismo umbrales de precipitación que para la configuración anterior. Cuando se ha analizado el dominio más externo con paso de malla de 45 km, se ha notado que la combinación que mejor resulta para el pronóstico de la precipitación, utilizando los datos de las estaciones convencionales, es la que combina, el esquema de microfísica de nubes WSM6 con la parametrización donde se utiliza el esquema Kain-Fritsch (Tabla 8). La misma combinación resulta al comprar los índices obtenidos utilizando estaciones automáticas (Tabla 9).

Para el dominio con paso de malla de 15 km, tanto si se usan estaciones automáticas como convencionales, se ha obtenido que la combinación que mejor resultados ofrece para el pronóstico de la precipitación, es la que combina el esquema de microfísica de nubes WSM6 con la parametrización de la convección que usa el esquema Grell G3.

**Tabla 8.** Tabla de índices categóricos, calculados para umbrales de 3 mm/24h, 10 mm/24h y 20 mm/24h, utilizando observaciones de estaciones convencionales. Los valores más significativos de CSI, POD y FAR están puestos en negrita.

	5 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	<b>0.83</b>	<b>0.68</b>	<b>0.47</b>	<b>0.91</b>	<b>0.83</b>	<b>0.74</b>	0.10	<b>0.21</b>	0.43
KF-WSM6	<b>0.83</b>	0.64	0.44	0.89	0.79	0.64	0.09	0.24	<b>0.37</b>
Ning-WSM6	0.76	0.55	0.38	0.81	0.65	0.52	<b>0.08</b>	0.23	<b>0.37</b>
	15 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	0.87	<b>0.68</b>	<b>0.49</b>	<b>0.98</b>	<b>0.90</b>	<b>0.82</b>	0.11	0.26	0.44
KF-WSM6	<b>0.89</b>	0.67	0.43	<b>0.98</b>	0.87	0.71	<b>0.09</b>	0.26	0.43
Ning-WSM6	0.74	0.59	0.44	0.82	0.72	0.64	<b>0.09</b>	<b>0.20</b>	<b>0.35</b>
	45 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	0.85	<b>0.65</b>	0.42	0.97	<b>0.93</b>	0.76	0.12	0.31	0.51
KF-WSM6	<b>0.87</b>	0.64	<b>0.48</b>	<b>0.99</b>	0.86	<b>0.85</b>	0.13	0.29	0.47
Ning-WSM6	0.75	0.57	0.44	0.82	0.70	0.69	<b>0.09</b>	<b>0.25</b>	<b>0.46</b>

**Tabla 9.** Tabla de índices categóricos, calculados para umbrales de 3mm/24h, 10 mm/24h y 20 mm/24h, utilizando observaciones de estaciones automáticas. Los valores más significativos de CSI, POD y FAR están puestos en negrita.

	5 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	0.62	<b>0.48</b>	0.25	0.90	<b>0.83</b>	<b>0.63</b>	0.32	0.43	0.70
KF-WSM6	<b>0.65</b>	0.39	<b>0.30</b>	<b>0.92</b>	0.68	<b>0.63</b>	0.30	0.48	<b>0.60</b>
Ning-WSM6	0.53	0.44	<b>0.30</b>	0.69	0.63	0.53	<b>0.26</b>	<b>0.37</b>	0.61
	15 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	<b>0.65</b>	0.44	<b>0.28</b>	<b>0.94</b>	0.80	<b>0.68</b>	0.32	0.49	0.65
KF-WSM6	0.64	<b>0.48</b>	0.21	0.92	<b>0.85</b>	0.52	0.32	0.45	<b>0.75</b>
Ning-WSM6	0.55	0.36	0.25	0.73	0.58	0.58	<b>0.26</b>	<b>0.42</b>	0.72
	45 km								
	CSI			POD			FAR		
	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h	3mm/24h	10mm/24h	20mm/24h
Grell-WSM6	<b>0.66</b>	<b>0.40</b>	0.16	0.94	<b>0.83</b>	0.48	0.30	0.55	0.80
KF-WSM6	<b>0.66</b>	0.36	<b>0.18</b>	<b>0.97</b>	0.78	<b>0.58</b>	0.33	0.55	<b>0.79</b>
Ning-WSM6	0.57	0.36	0.16	0.78	0.64	0.48	<b>0.25</b>	<b>0.48</b>	0.81

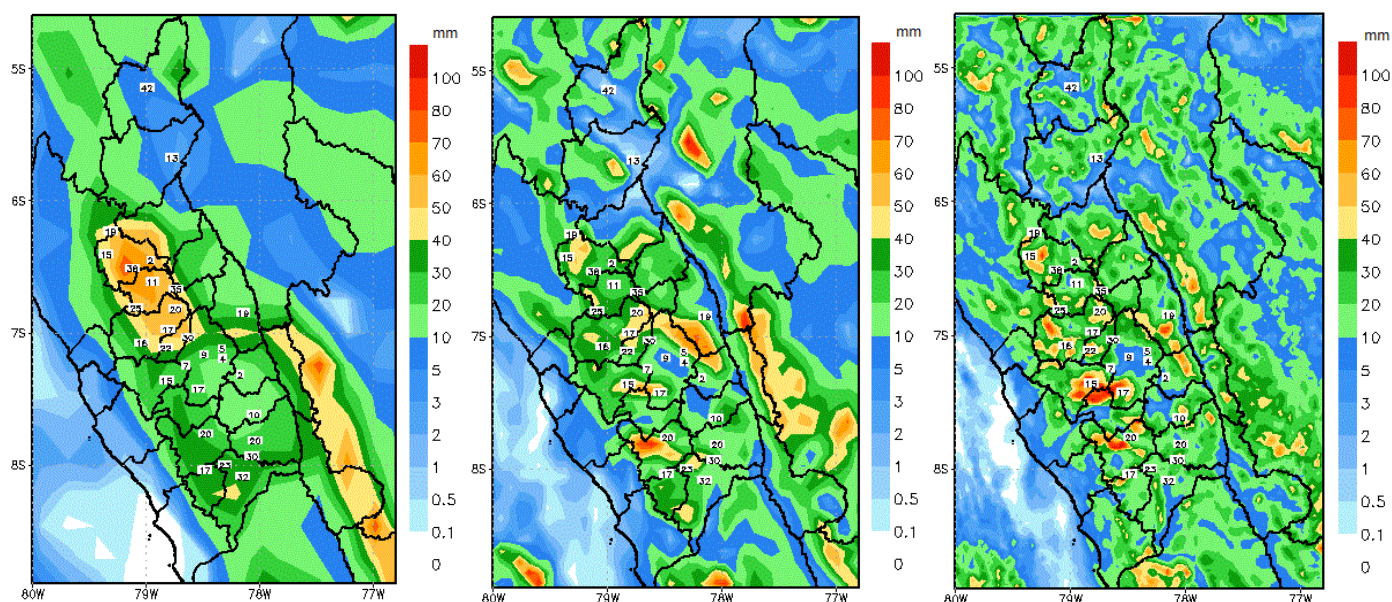
En el caso del dominio con paso de malla más pequeño 5 km, con las estaciones convencionales se ha obtenido, que el mejor resultado para el pronóstico de la precipitación resulta de la combinación del esquema de microfísica de nubes WSM6 con la parametrización de la convección donde se utiliza el esquema Grell G3 (Tabla 8). Mientras que al utilizar datos de estaciones automáticas y calcular los índices de verificación, el mejor resultado se obtiene, de la combinación de microfísica de nubes WSM6 con la parametrización de la convección que utiliza el esquema Kain-Fritsch (Tabla 9).

Se ha evaluado el parámetro de la precipitación en ambas cascadas de dominios. Una forma de poder discernir cuál de estas dos configuraciones de dominios ha sido la más adecuada y ha dado resultados más satisfactorios en el pronóstico de la precipitación, sería fijarnos, cual ha proporcionado valores más altos de índices POD, CSI y más bajos de FAR. Si comparamos los dominios con paso de malla 3 km y 5 km, se ha observado que se han obtenido los valores más bajos del índice FAR y ligeramente más altos de los índices POD y CSI, con el dominio con paso de malla 3 km. La comparación

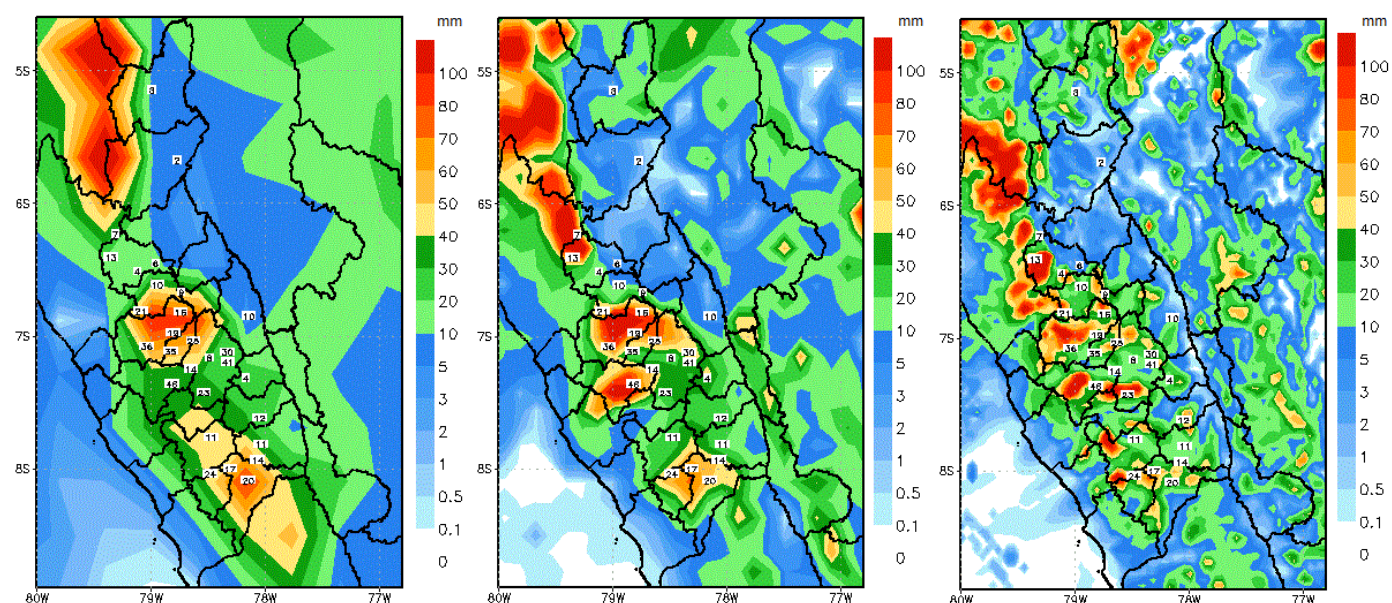
realizada entre los dominios con paso de malla de 9 km y 15 km, no mostraron una diferencia apreciable, estos fueron muy parecidos. Lo mismo se puede decir al tratar de comparar los dominios con paso de malla de 27 km y 45 km. Por lo tanto, solo con los índices calculados, no es posible diferenciar cuales de estos dominios últimos mencionados nos proporciona los mejores resultados.

Se ha hecho también, un análisis de las salidas mediante las observaciones de los mapas de precipitaciones dibujados con ayuda del GrADS. Como ejemplo se muestra las gráficas para dos eventos (Figura 4 y 5). Además se ha calculado las distancias en kilómetros entre el punto de malla más cercano y la estación, para conocer aproximadamente que tan cerca están a las estaciones estos puntos y tener una idea de lo bueno que puede ser esta primera aproximación del punto más cercano. Por ejemplo se puede mencionar que para el dominio con paso de malla 3 km estas distancias estuvieron comprendidas entre el intervalo de 0.32 km y 1.97 km aproximadamente. Para el dominio con paso de malla de 5 km estas distancias estuvieron comprendidas entre los 0.69 km y 3.2 km.





**Figura 4.** Precipitación simulada para la Sierra Norte del Perú utilizando el modelo WRF para el evento ocurrido el día 14/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km con anidamientos de 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y esquema de convección Grell G3. Los valores numéricos que se muestran son datos observados de estaciones convencionales.



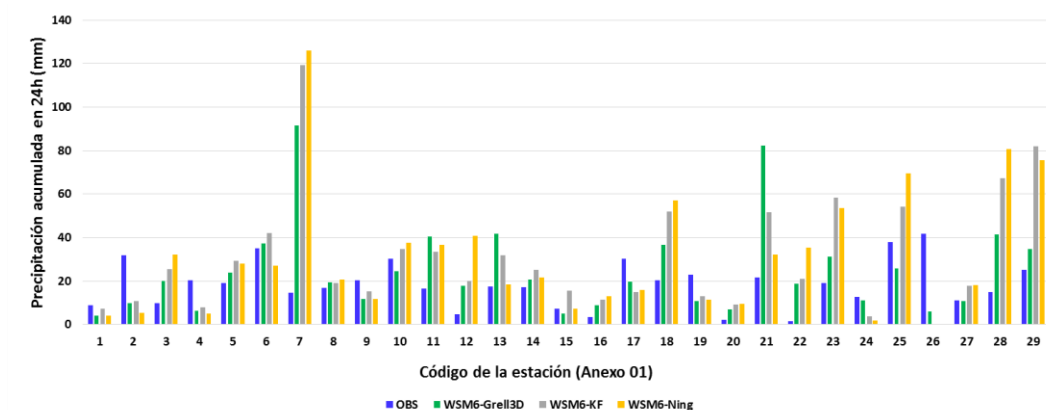
**Figura 5.** Precipitación simulada en la Sierra Norte del Perú utilizando el modelo WRF para el evento ocurrido el día 09/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km con anidamientos de 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y esquema de convección Kain-Fritsch. Los valores numéricos que se muestran son datos observados de estaciones convencionales

La Figura 4, muestra la precipitación acumulada en 24 horas, para el evento simulado el día 14 de marzo del 2017. La configuración mostrada es la cascada de dominios de 27 km, 9 km y 3 km de paso de malla. Se ha usado para esta simulación la configuración de parametrización de microfísica de nubes WSM6, con la parametrización de convección donde se utiliza el esquema Grell G3.

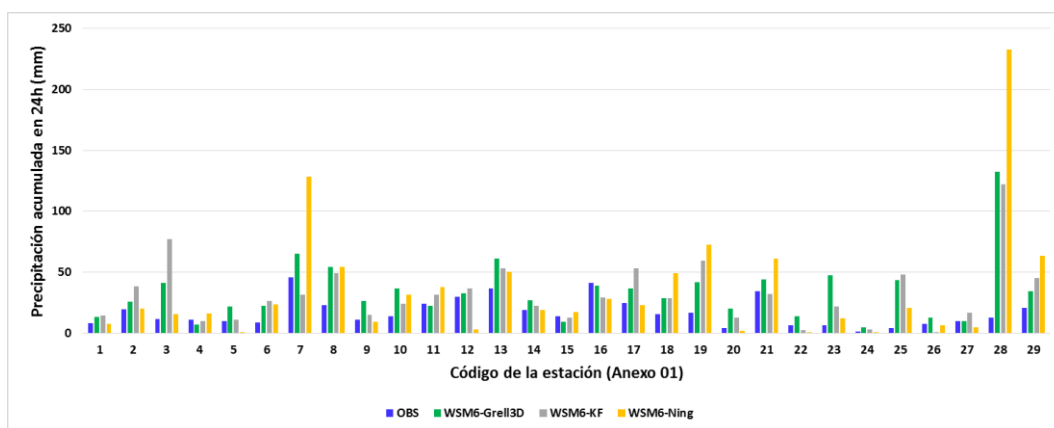
La Figura 5, muestra la precipitación acumulada para 24 horas del evento ocurrido el día 09 de marzo del 2017. La configuración de dominios que se muestra es la cascada de

dominios de 45 km, 15 km y 5 km de paso de malla. Se ha usado en esta simulación la combinación de la parametrización de microfísica de nubes WSM6, con la parametrización de convección que utiliza el esquema Kain-Fritsch.

De estas figuras y con ayuda de gráficos de barras (Figura 6 y 7) se analiza cualitativamente, como es el comportamiento de la precipitación simulada con el modelo y la observada teniendo en cuenta también las otras dos combinaciones a la parametrización de la convección. Particularmente para el evento ocurrido el día 14 de marzo del 2017, considerando el



**Figura 6.** Precipitación acumulada en 24 horas en estaciones convencionales para dominio con paso de malla 3 km. Se muestran también los valores simulados para diferentes opciones de la parametrización de la convección. Evento ocurrido el día 14/03/2017.



**Figura 7.** Precipitación acumulada en 24 horas en estaciones convencionales para dominio con paso de malla 5 km. Se muestran también los valores simulados para diferentes opciones de la parametrización de la convección. Evento ocurrido el día 09/03/2017.

dominio con paso de malla 3 km, todas las combinaciones de la parametrización de la convección que se hicieron con el modelo para este día, tendieron a sobreestimar la precipitación ocurrida. Esto se puede ver al comparar los valores de precipitación observados con los simulados, tanto en el mapa de precipitación como en el gráfico de barras. Lo mismo ocurrió en los otros dominios de 9 km y 27 km de paso de malla.

Si analizamos el evento del día 09 de marzo del 2017, podemos ver en el mapa de precipitación y en el gráfico de barras que para el dominio con paso de malla 5 km todas las combinaciones de la parametrización de la convección con el esquema de microfísica de nubes WSM6 tendieron a sobreestimar la precipitación para este día. Lo mismo se apreció con los dominios con paso de malla de 15 km y 45 km.

## 5 Conclusiones

En este trabajo se han realizado pruebas de la sensibilidad a la parametrización de la convección, utilizando la versión 3.7.1 de modelo WRF. Se ha utilizado el esquema de microfísica de nubes WSM6, con tres combinaciones para la parametrización de la convección. El objetivo ha sido encontrar cuál de estas, es la que mejor resultado nos daría en el pronóstico de la precipitación.

Los mejores resultados para los dominios de paso de malla 27 km y 3 km se obtuvieron utilizando el esquema de la convección Grell G3. Mientras que para el dominio con paso de malla de 9 km la mejor combinación se encontró con el esquema de Kain-Fritsch.

Para el dominio con paso de malla de 45 km, los mejores resultados se obtuvieron con la parametrización que usa el esquema Kain-Fritsch. Asimismo, para los dominios con paso de malla de 15 km y 5 km, los mejores resultados se obtuvieron usando el esquema convectivo Grell G3.

De las dos configuraciones de dominios la que mejor resultados brindó fue, la cascada de dominios 27 km con anidamientos de 9 km y 3 km.

Cabe mencionar que dado que existen 13 opciones de parametrización de la convección y 22 opciones de parametrización de la microfísica de nubes, la significatividad de los resultados tiene ciertas limitaciones y se deben analizar otras opciones más.

Se ha utilizado solo eventos de los meses febrero y marzo del año 2017. Dada la variabilidad interanual del campo de la precipitación, es deseable utilizar también eventos de otros años para realizar otras simulaciones.



## ANEXO 01

Tabla de estaciones convencionales y automáticas utilizadas en este trabajo y que pertenecen a la red de estaciones del SENAMHI.

COD	NOMBRE	TIPO	LAT(°)	LONG(°)	ALT(m.s.n.m)
1	AUGUSTO WEBERBAUER	Convencional	-7.1675	-78.49309	2673
2	CACHICADAN	Convencional	-8.09184	-78.14938	2900
3	CAJABAMBA	Convencional	-7.62166	-78.05131	2625
4	CALLANCAS	Convencional	-7.76747	-78.47727	1501
5	CELENDIN	Convencional	-6.85292	-78.14485	2602
6	CHUGUR	Convencional	-6.67091	-78.73717	2757
7	CONTUMAZA	Convencional	-7.36521	-78.82273	2542
8	COSPAN	Convencional	-7.42857	-78.54106	2423
9	HUAMACHUCO	Convencional	-7.81916	-78.04013	3186
10	HUANGACocha	Convencional	-7.93761	-78.06811	3763
11	JULCAN	Convencional	-8.04229	-78.48607	3385
12	LA ENCANADA	Convencional	-7.12327	-78.33314	2980
13	LIVES	Convencional	-7.0802	-79.04045	1931
14	LLAPA	Convencional	-6.97833	-78.81119	2932
15	MAGDALENA	Convencional	-7.25346	-78.65261	1307
16	NAMORA	Convencional	-7.2006	-78.32782	2744
17	GRANJA PORCON	Convencional	-7.03753	-78.6334	3149
18	QUILCATE	Convencional	-6.82275	-78.744	3082
19	QUIRUVILCA	Convencional	-8.00422	-78.30791	4047
20	SAN MARCOS	Convencional	-7.32249	-78.1727	2287
21	SAN PABLO	Convencional	-7.11775	-78.83083	2338
22	HUAMBOS	Convencional	-6.45368	-78.96315	2263
23	INCAHUASI	Convencional	-6.23389	-79.31806	3052
24	JAEN	Convencional	-5.67664	-78.77416	618
25	LLAMA	Convencional	-6.51443	-79.12262	2096
26	SAN IGNACIO	Convencional	-5.14708	-78.99512	1243
27	SANTA CRUZ	Convencional	-6.61657	-78.94761	2002
28	TOCMOCHE	Convencional	-6.40806	-79.35583	1435
29	UDIMA	Convencional	-6.81474	-79.09377	2466
30	UNC CAJAMARCA	Automática	-7.16747	-78.49307	2673
31	CAJABAMBA GORE	Automática	-7.62167	-78.05111	2480
32	CALLANCAS	Automática	-7.7675	-78.47729	1501
33	CELENDIN GORE	Automática	-6.85303	-78.14487	2602
34	CHUGUR	Automática	-6.66667	-78.73333	2744
35	COSPAN	Automática	-7.42856	-78.54106	2423
36	CRISNEJAS	Automática	-7.46335	-78.11317	1996
37	MARMOT	Automática	-7.7635	-78.66725	2925
38	QUIRUVILCA	Automática	-8.00419	-78.3079	4047
39	SAN MARCOS	Automática	-7.32254	-78.17275	2287
40	USQUIL	Automática	-7.8186	-78.41497	3123
41	BAMBAMARCA	Automática	-6.679958	-78.523631	2565
42	CHANCA Y BAÑOS	Automática	-6.574892	-78.867211	1645
43	CUMBA	Automática	-5.941353	-78.664133	449
44	CUTERVO GORE	Automática	-6.379139	-78.813389	2616
45	JAEN GORE	Automática	-5.676664	-78.774181	618
46	MUCHAL	Automática	-6.479061	-79.257219	1701
47	TUNEL CHOTANO	Automática	-6.540486	-78.784317	2027

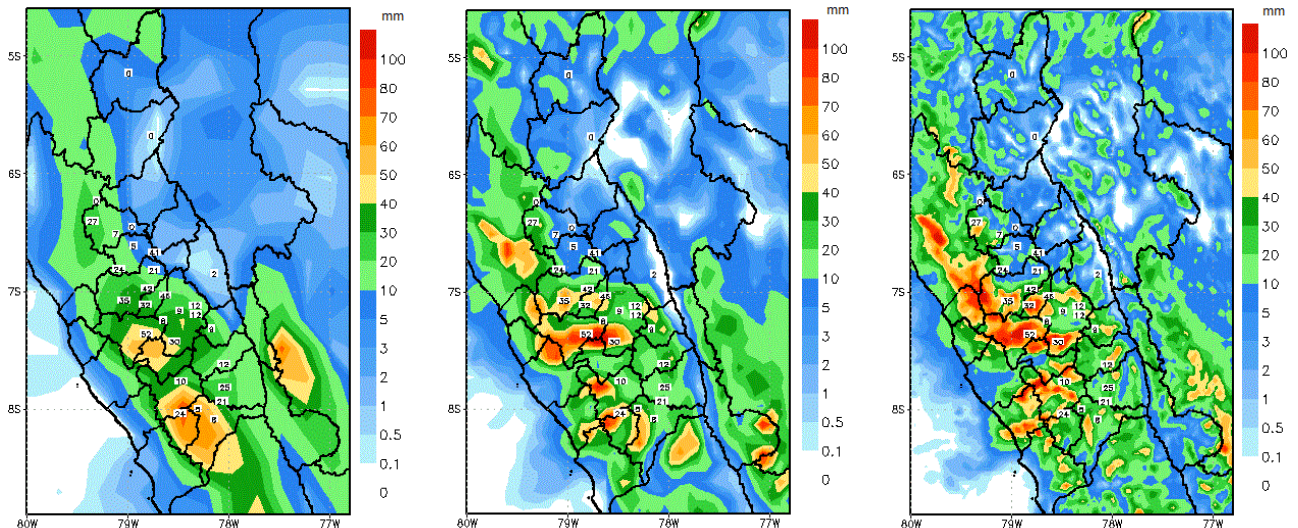


**Agradecimientos.** Quiero agradecer al Programa Nacional de Becas del Perú, por haberme otorgado la beca que me ha permitido realizar los estudios de maestría en la Universidad de Barcelona. A los profesores del Departamento de Física Aplicada, en especial a mi tutor Profesor Bernat Codina, por guiarme en el desarrollo de este trabajo. Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú por brindarme los datos de las estaciones utilizadas.

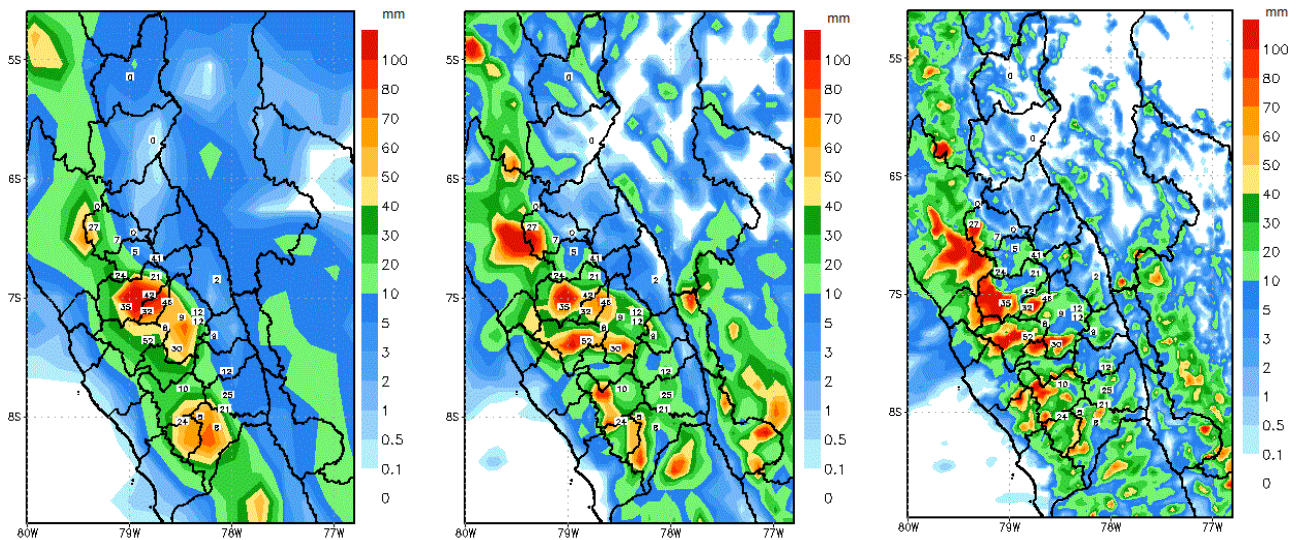
## Referencias

- Ebert, E. E., 2009: Neighborhood Verification: A Strategy for Rewarding Close Forecasts. *Weather and Forecast.* 24: 1498–1510, <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222251.1>
- Ebert, E. E., 2008: Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework, *Meteorol Appl.* 15, 51–64, <https://doi.org/10.1002/met.25>
- Garreaud, R. D., 1999: Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 901–921, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<0901:MAOTSP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0901:MAOTSP>2.0.CO;2)
- Garreaud, R., 2009. The Andes climate and weather. *Adv. Geosci.* 7, 1–9.
- Jiménez M., 2014. Validación de la capacidad del modelo WRF “Weather Research and Forecasting” para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia, [bdigital.unal.edu.co/49615](http://bdigital.unal.edu.co/49615).
- Junquas C., Takahashi K., Condom T., Espinoza JC., Chavez, S., Sicart JE, Lebel T., 2017: Understanding the influence of orography over the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes, *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-017-3858-8.
- Kain, J. S., Weiss, S. J., Levit, J. J., Baldwin, M. E., y Bright, D. R., 2006: Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004, *Wea Forecasting*, 21, 167–181, <https://doi.org/2004/10.1175/WAF906.1>
- Lagos, P., Y. Silva, E. Nick and K. Mosquera, 2008: El Niño-related precipitation variability in Perú. *Advances in Geosciences*, 14, 231–237.
- Lavado W., Ronchail J, Labat D, Espinoza JC and Guyot J. L., Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages, 2012 *Hydrological Sciences Journal*, 57, 4, (625)
- Mercader J, Codina B, Sairouni A, Cunillera J., 2010: Resultados del modelo meteorológico WRF-ARW sobre Cataluña, utilizando diferentes parametrizaciones de la convección y la microfísica de nubes. *Tethys Journal of Weather and Climate of the Western Mediterranean*, 7: 77 – 89, doi: 10.3369/tethys.2010.7.07
- Saavedra, Y, 2016: Validación del modelo WRF en el Valle de Cajamarca, Región Cajamarca, Perú, <http://repositorio.uc-hile.cl/handle/2250/139925>
- Silva Dias, P. L., W. H. Schubert, and M. DeMaria, 1983: Largescale response of the tropical atmosphere to transient convection. *J. Atmos. Sci.*, 40, 2689–2707, doi:10.1175/1520-469(1983)040<2689:LSROTT>2.0.CO;2
- Uribe, A. 2012: Estimación de la capacidad del modelo WRF para pronosticar eventos extremos asociados con altas precipitaciones en la región Andina Colombiana. Tesis de Magister en Meteorología. Universidad Nacional de Colombia.
- Wang Wei, Bruyere Cindy, Duda Michael, Dudhia Jimmy, Gill Dave, Lin Hui-Chan, Michalakes John, Rizvi Syed, Zhang Xin, 2012: ARW Version 3 Modeling System User’s Guide. [http://virga.sfsu.edu/WRF/Docs/WRF-ARW\\_UsersGuideV3.pdf](http://virga.sfsu.edu/WRF/Docs/WRF-ARW_UsersGuideV3.pdf)
- Zheng, Y., K. Alapaty, J.A. Herwehe, A.D. Del Genio, and D. Niyogi, 2016: Improving High-Resolution Weather Forecasts Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an Updated Kain–Fritsch Scheme. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 833–860, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0005.1>

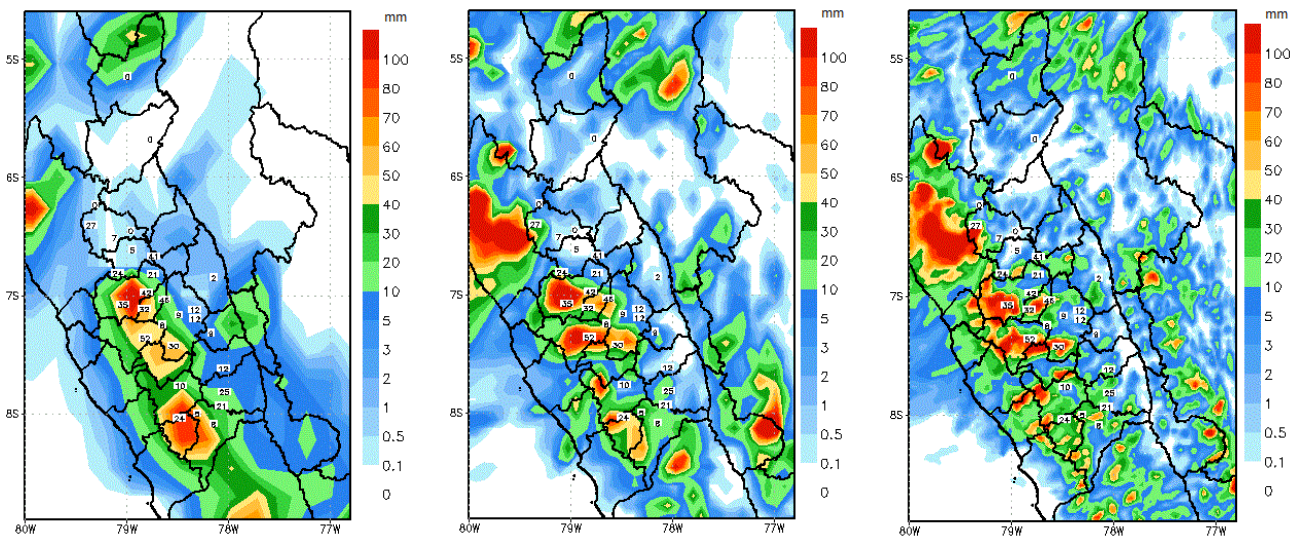
Gráficos adicionales de las simulaciones hechas con el modelo WRF, comparadas con datos de precipitación (valores numéricos) medidos en estaciones convencionales



Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 08/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.

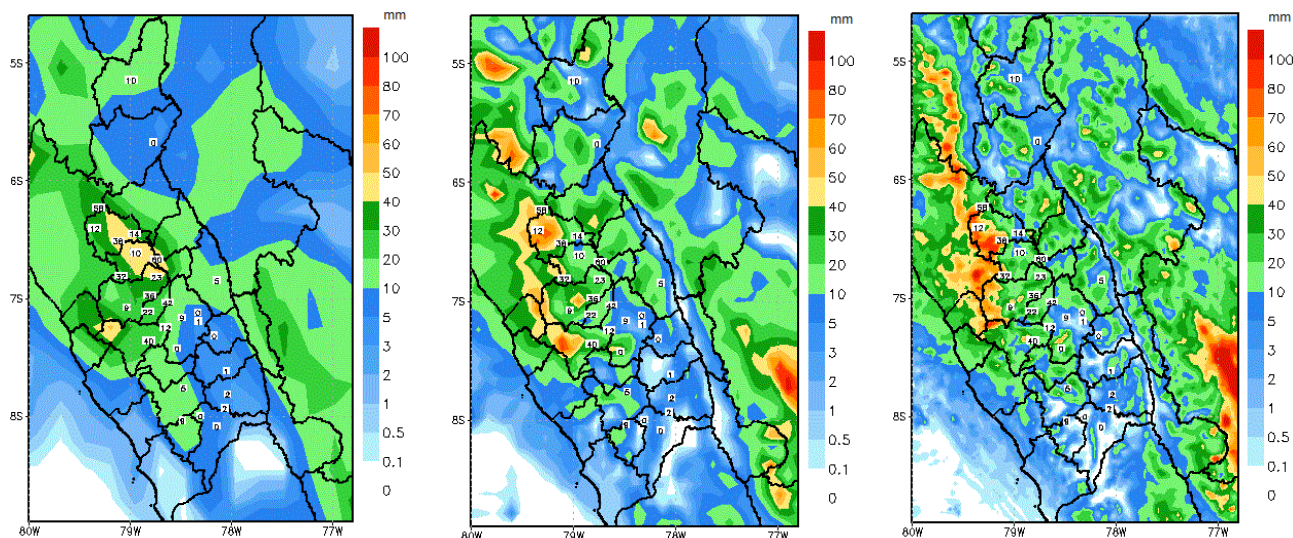


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 08/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.

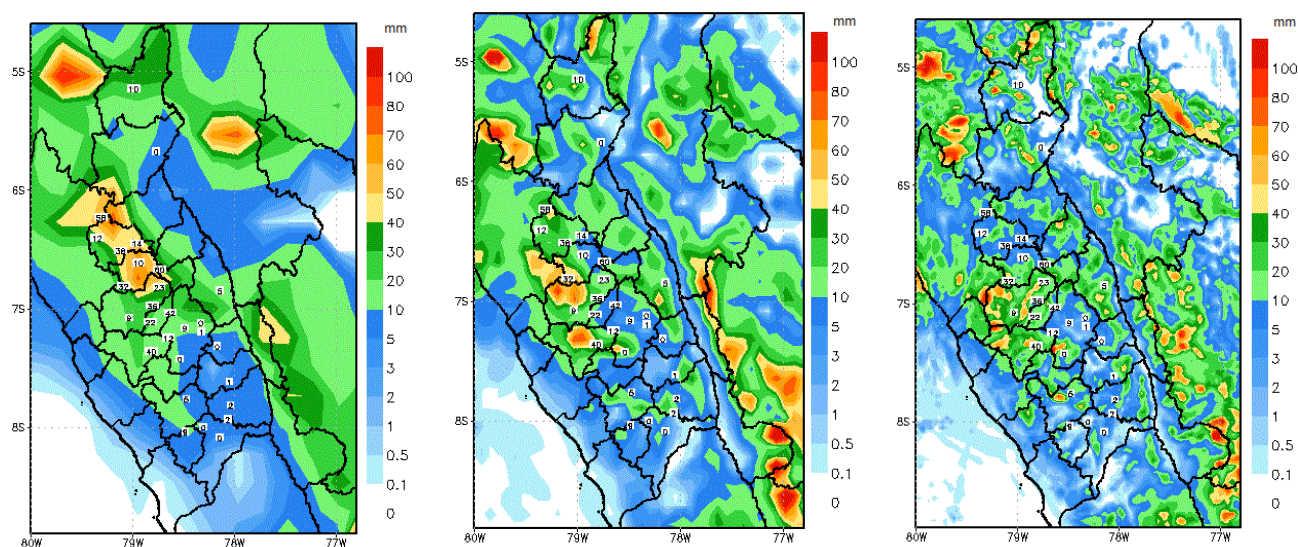


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 08/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.

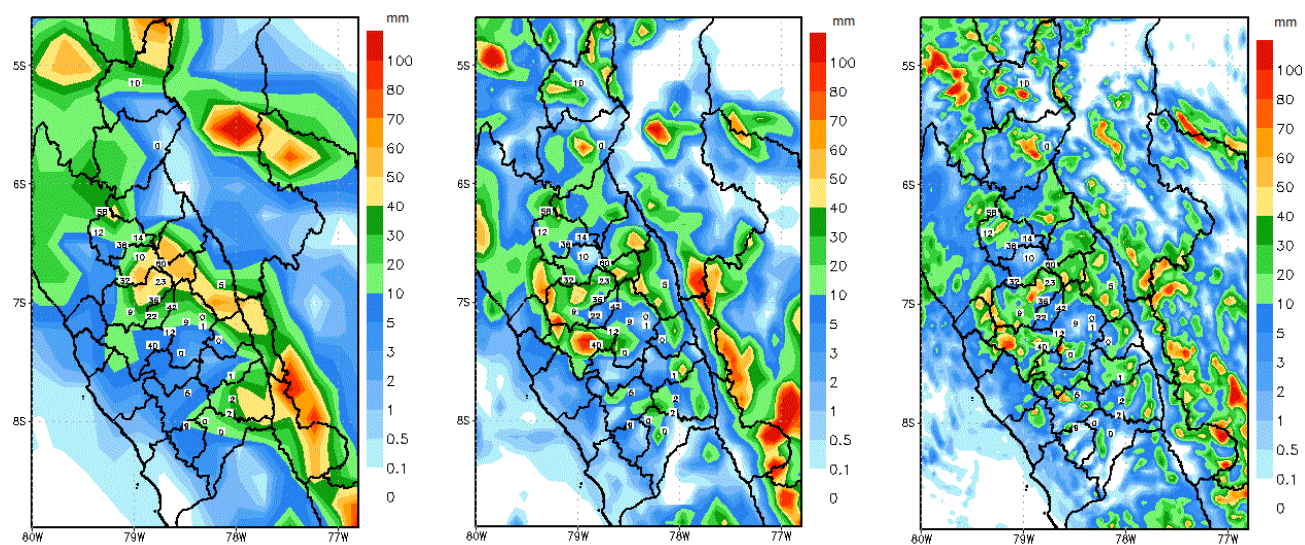




Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 10/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.

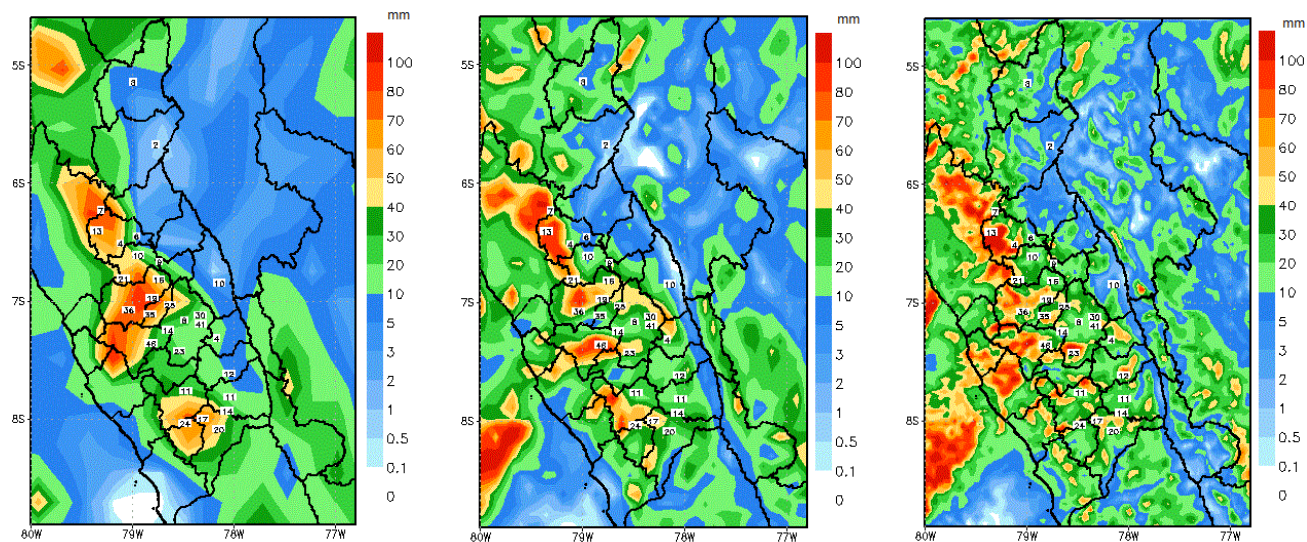


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 10/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.

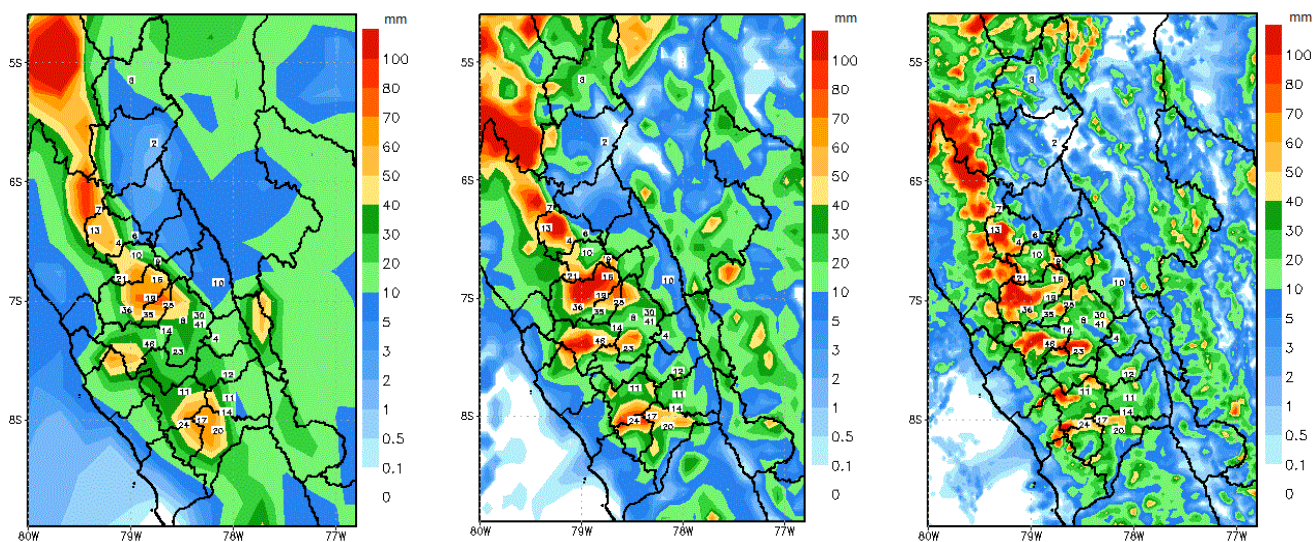


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 10/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.

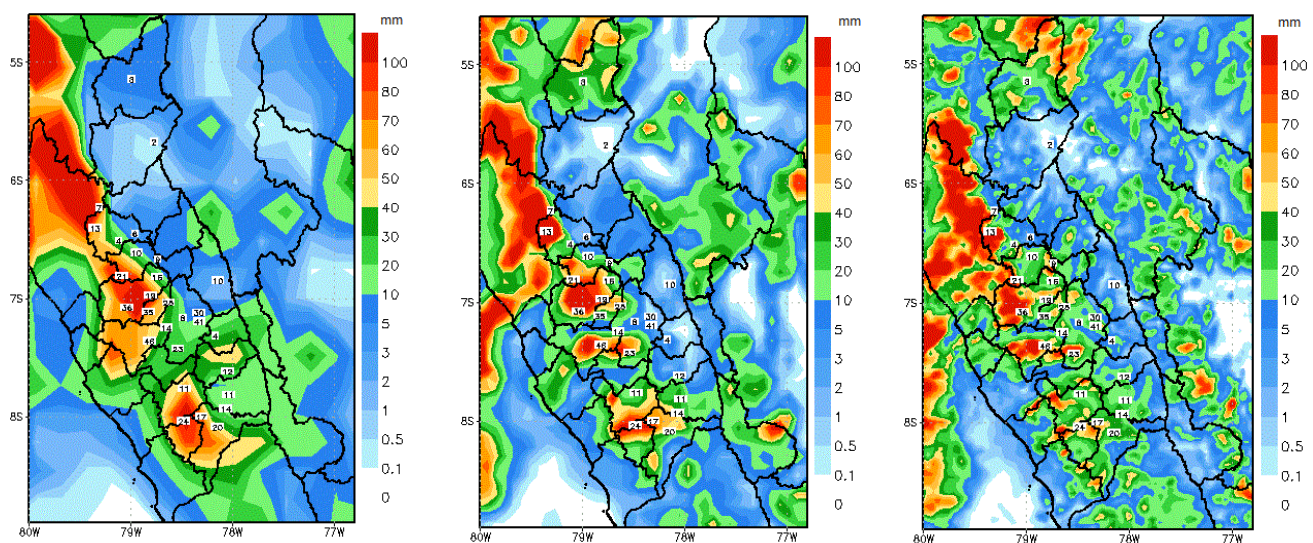




Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 09/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.

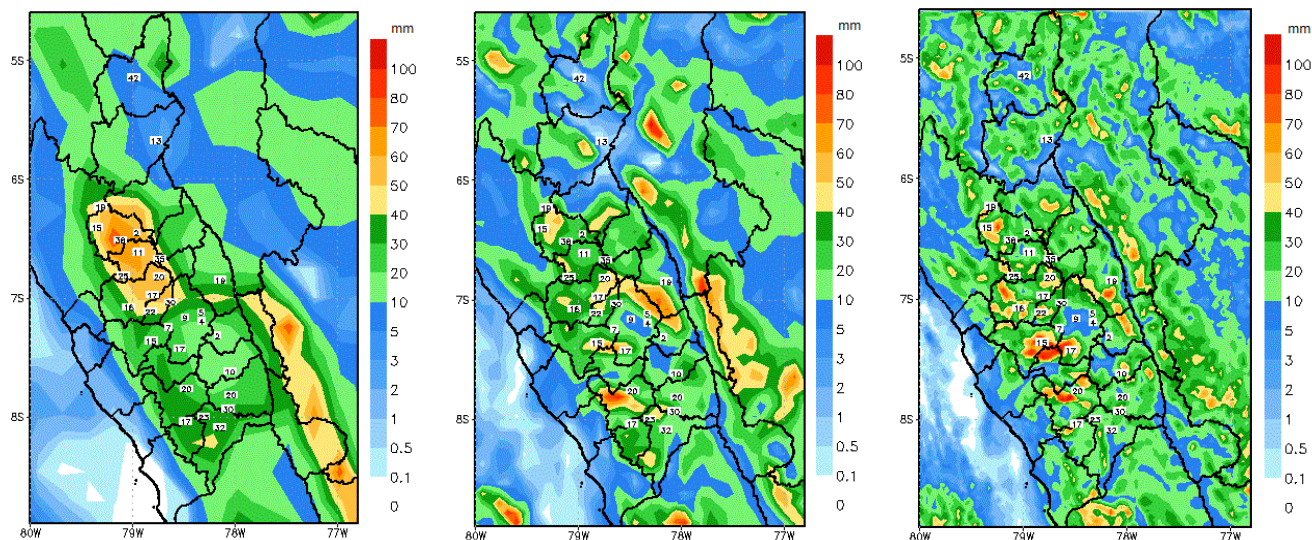


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 09/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.

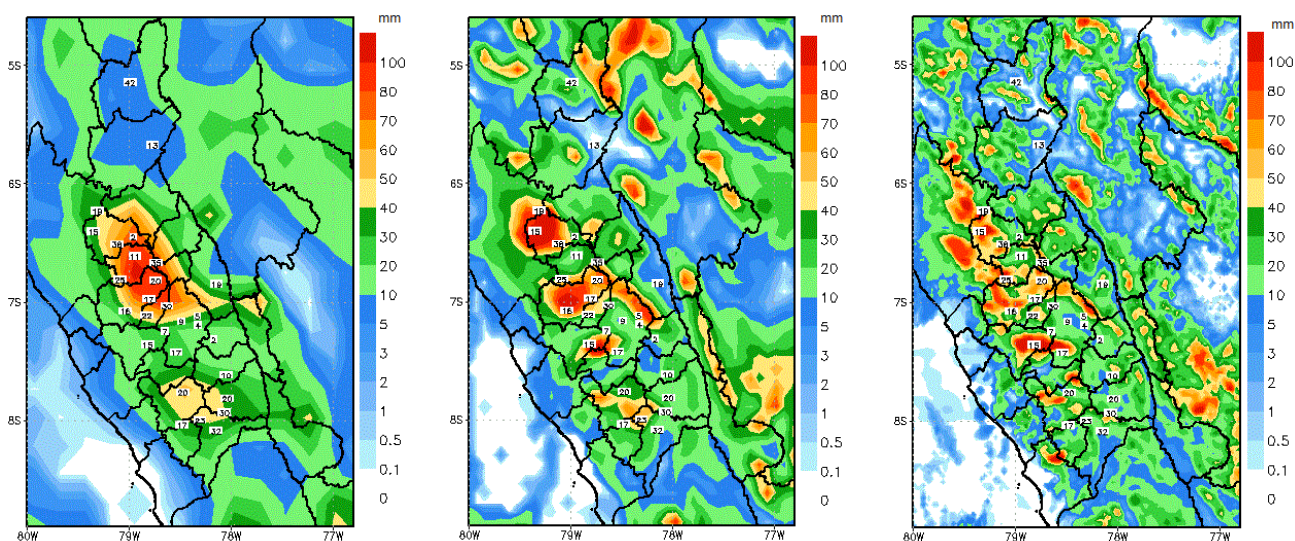


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 09/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.

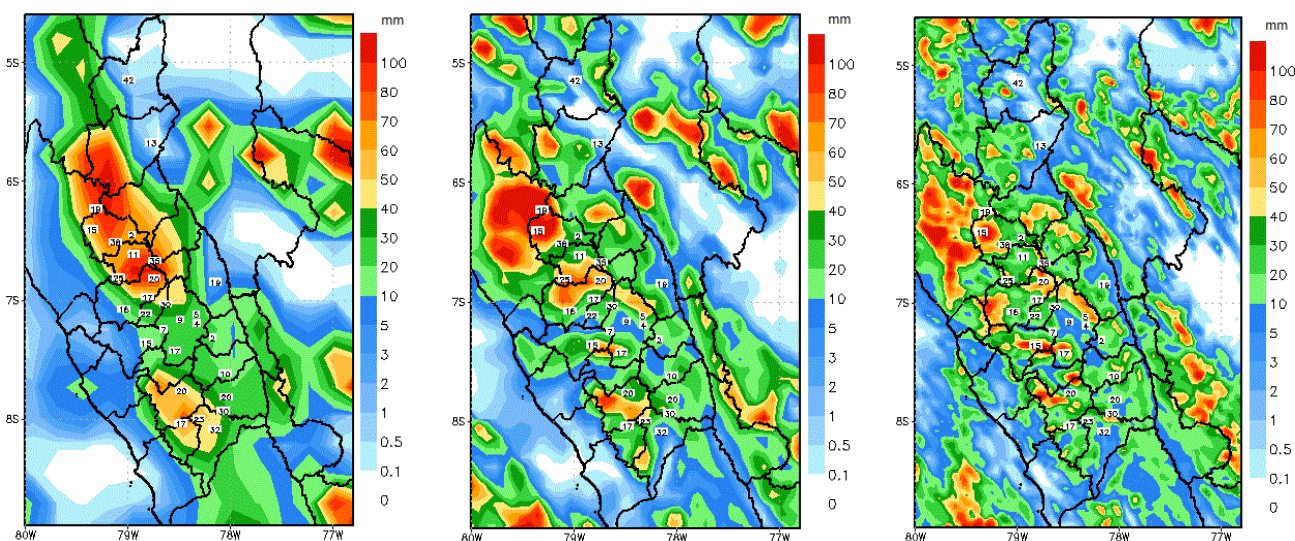




Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 14/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.

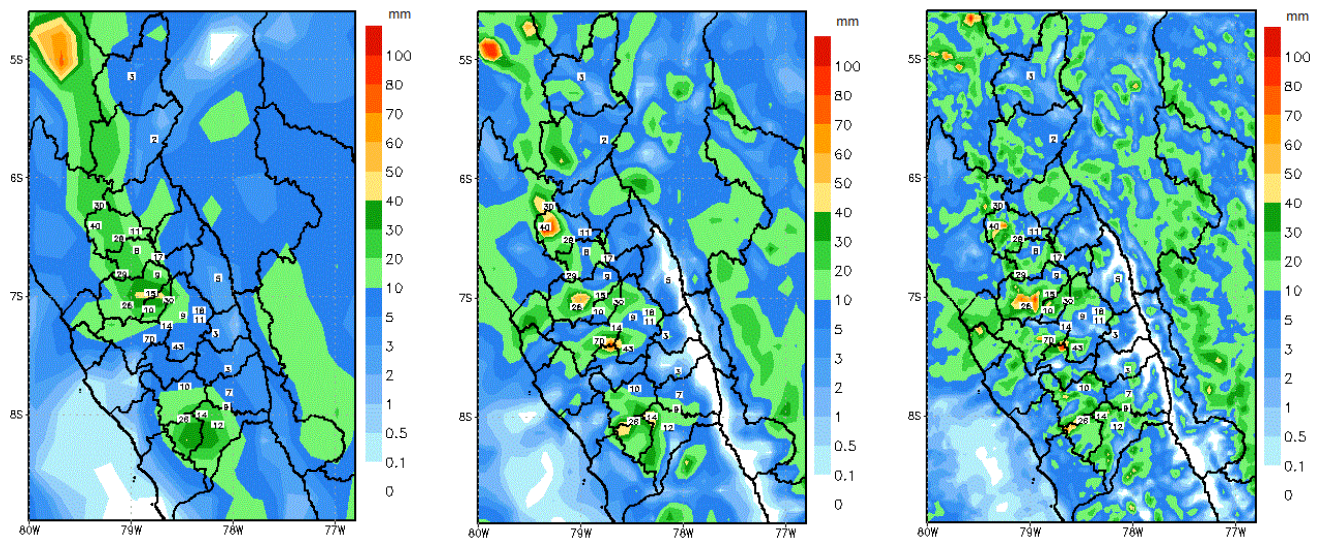


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 14/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.

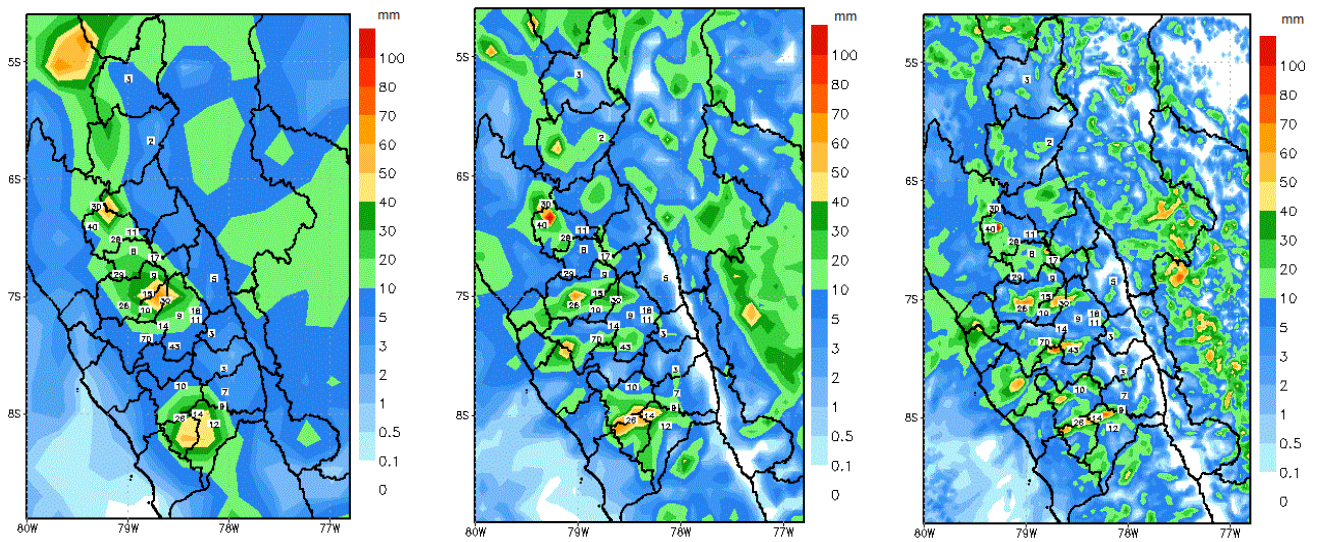


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 14/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.

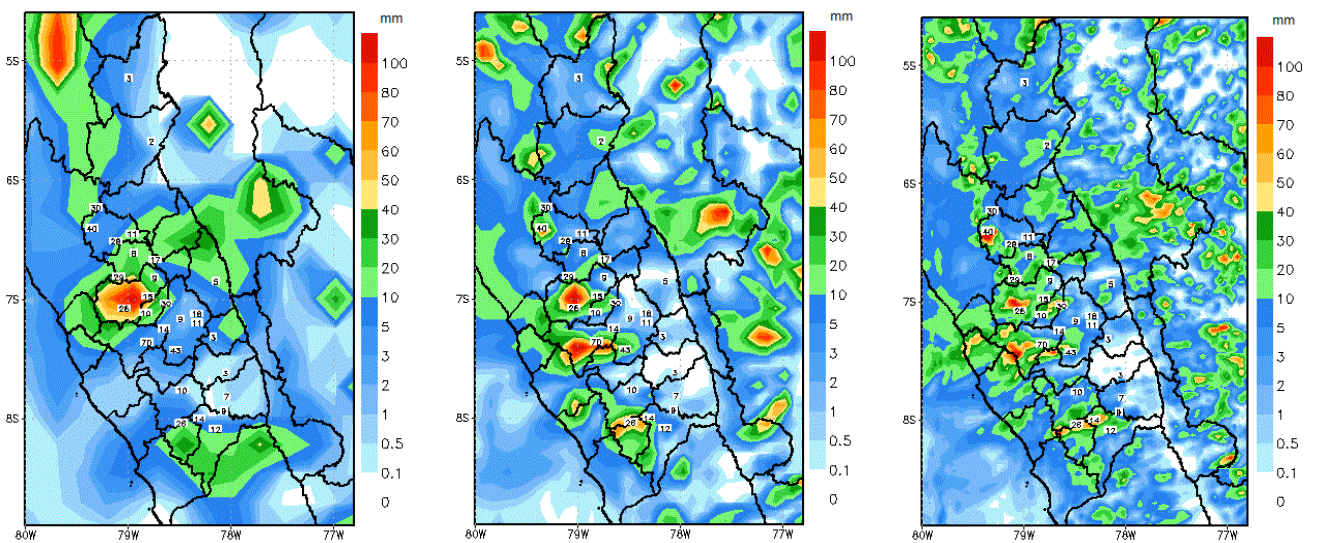




Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 31/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.

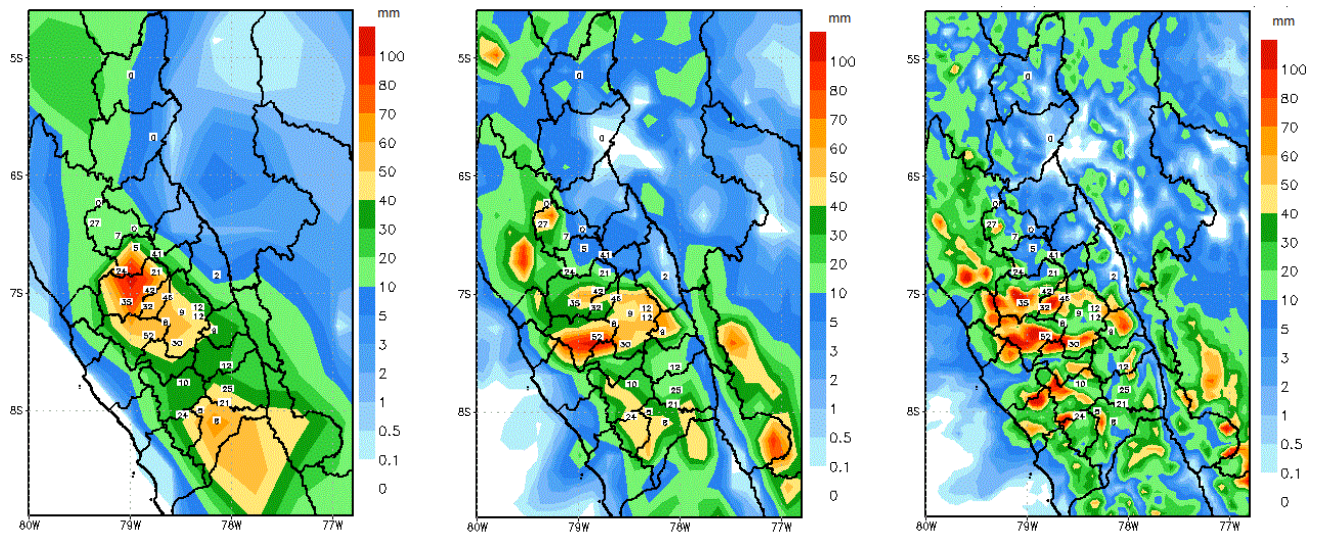


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 31/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.

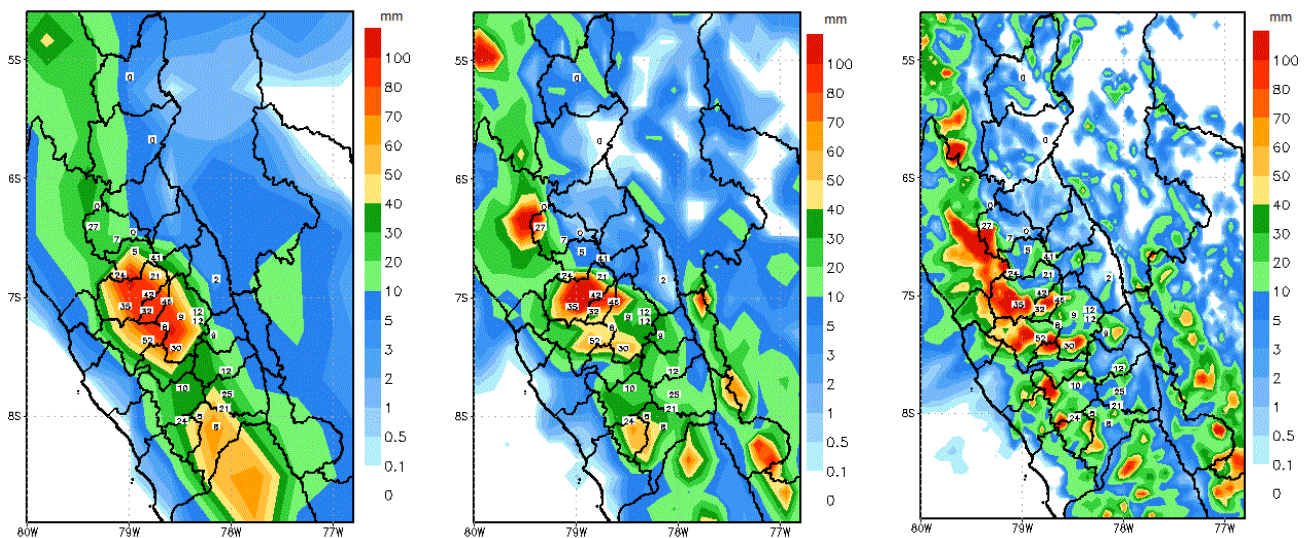


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 31/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 27 km, 9 km y 3 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.

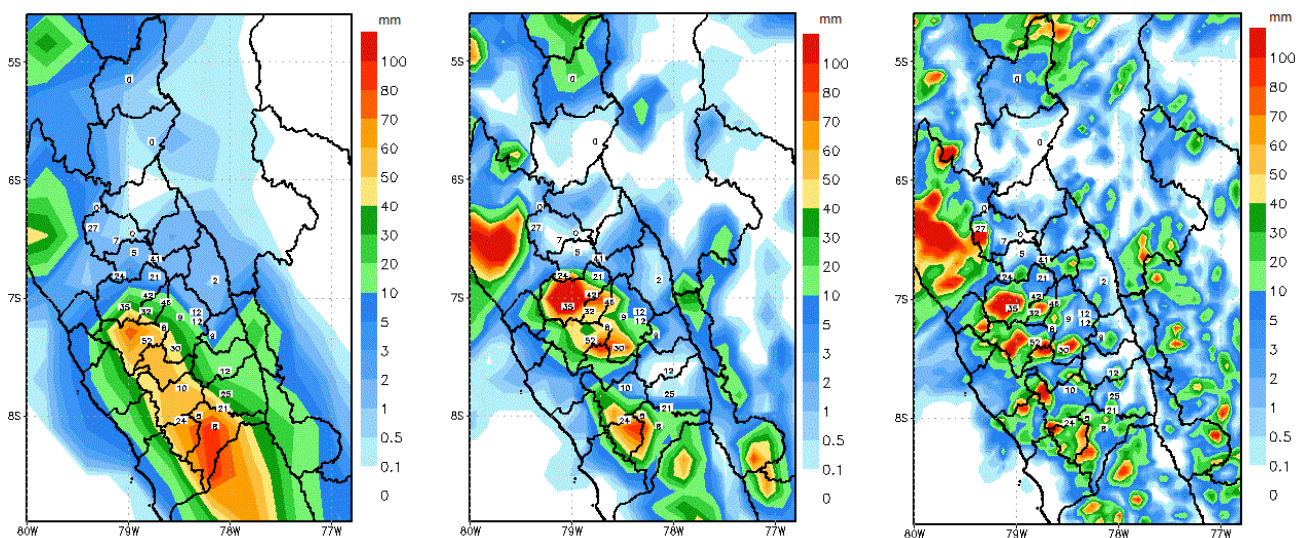




Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 08/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.

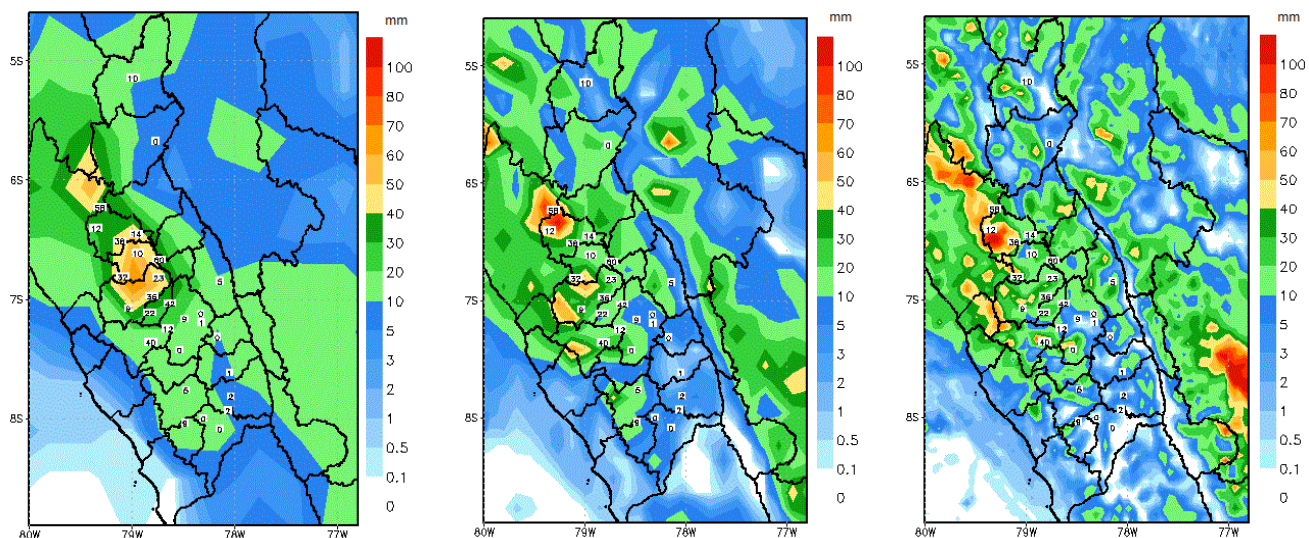


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 08/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.

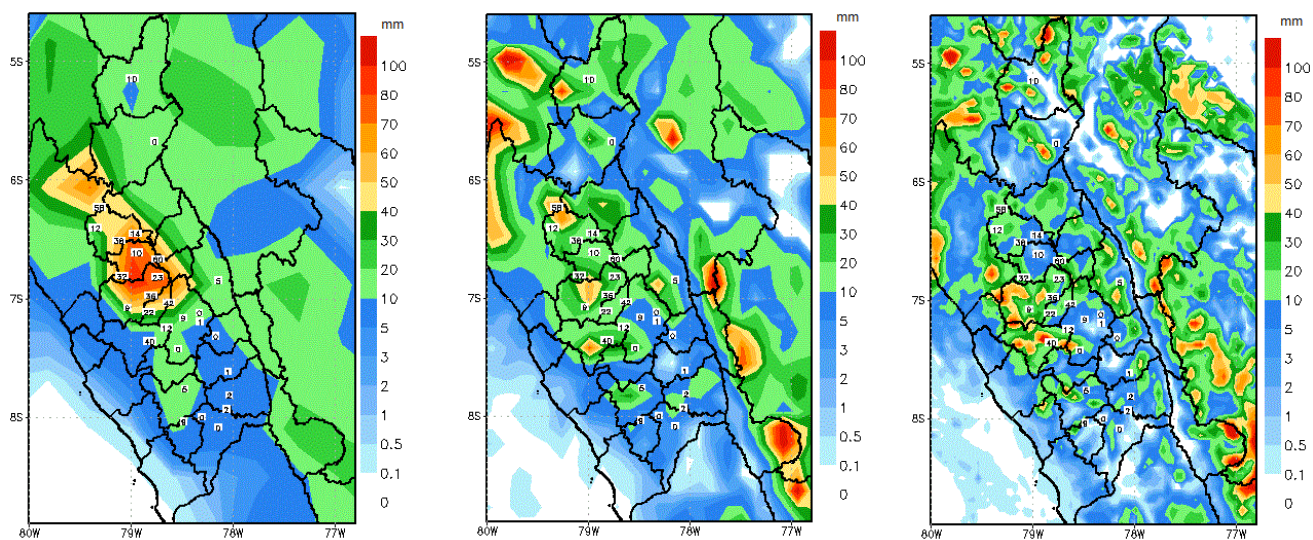


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 08/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.

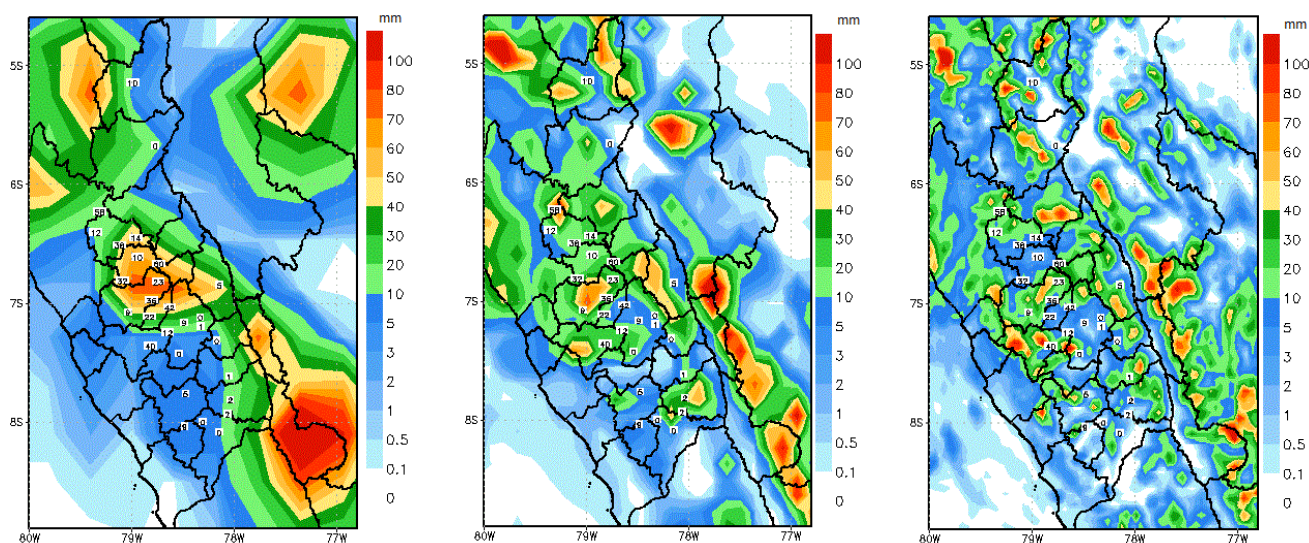




Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 10/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.

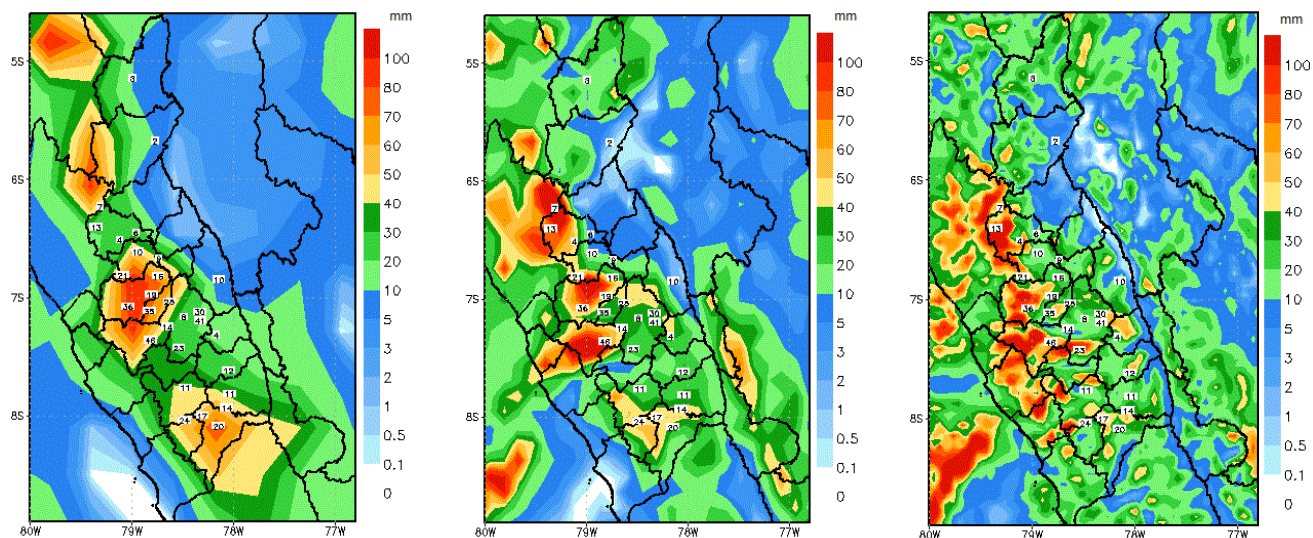


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 10/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.

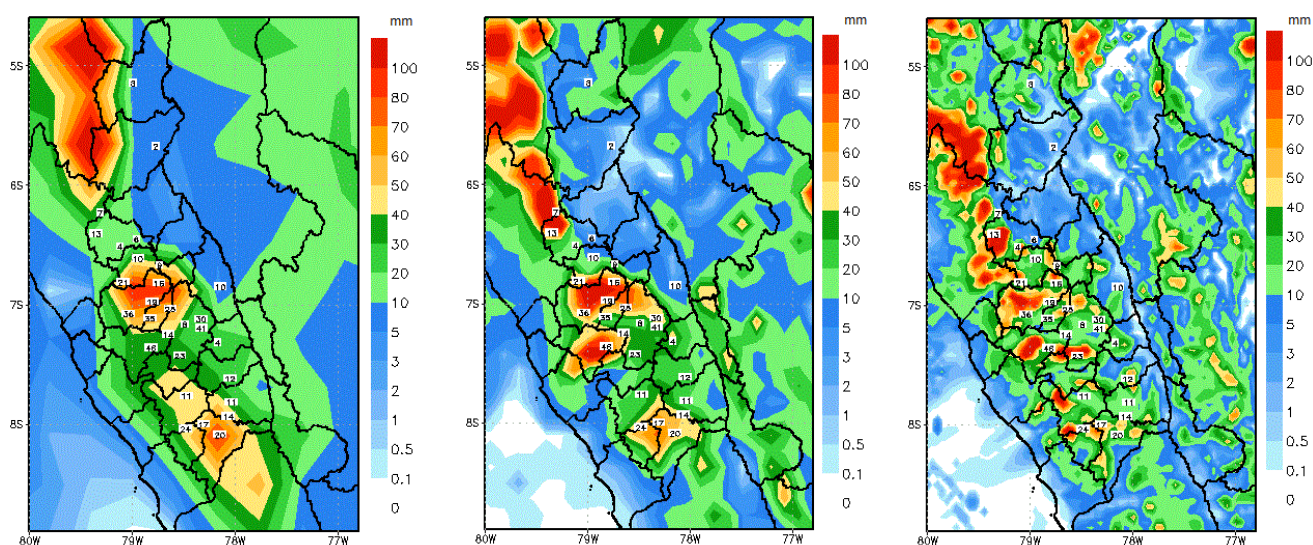


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 10/02/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.

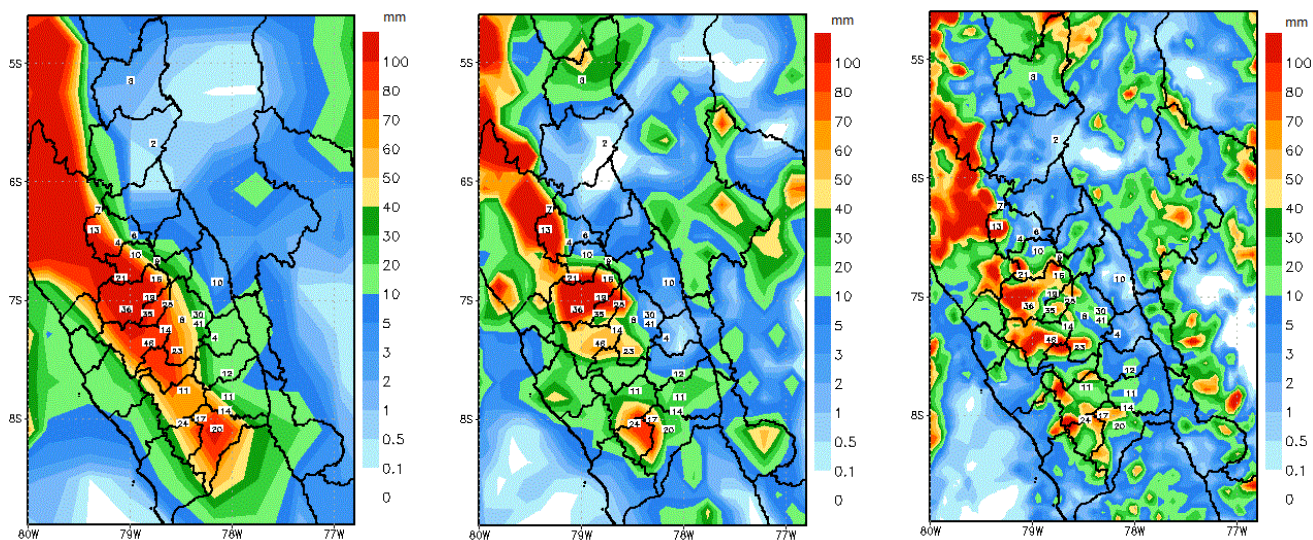




Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 09/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.

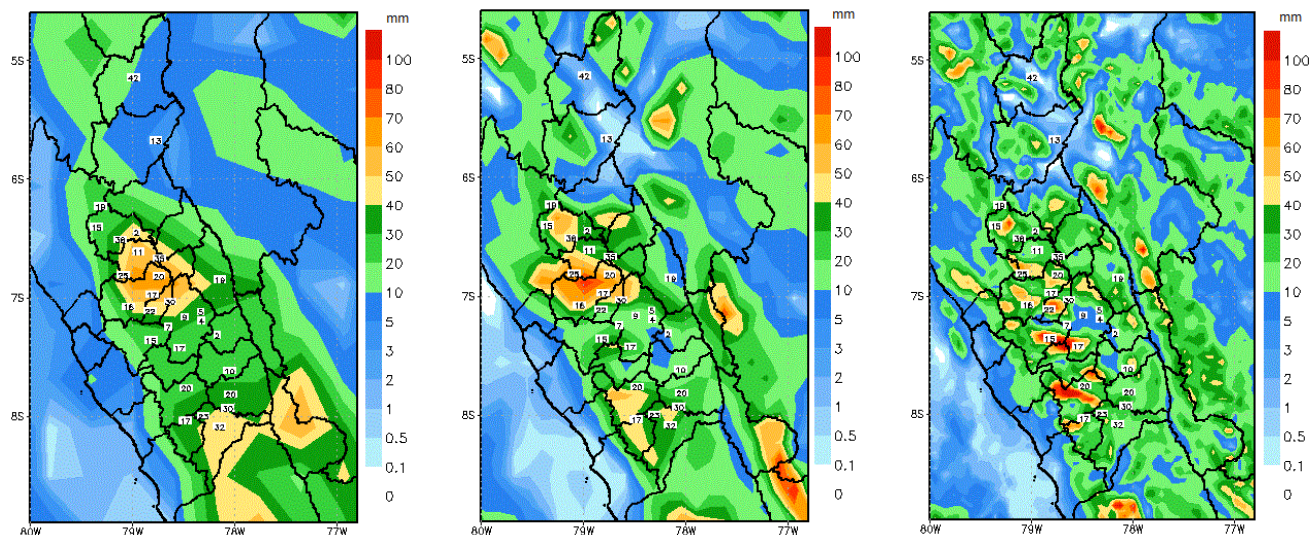


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 09/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.

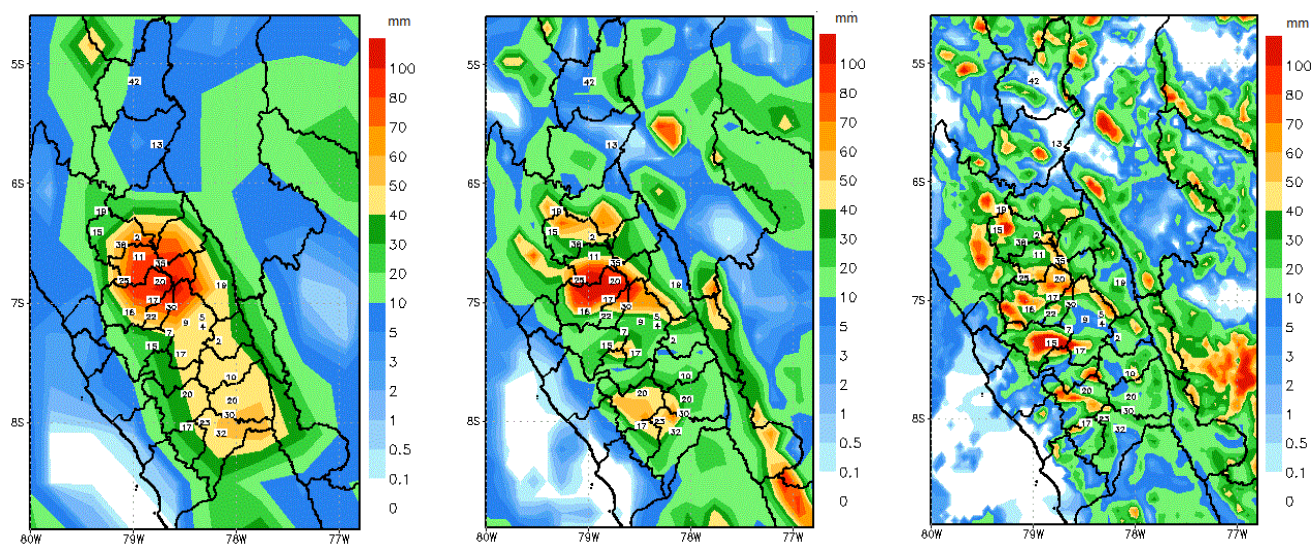


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 09/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.

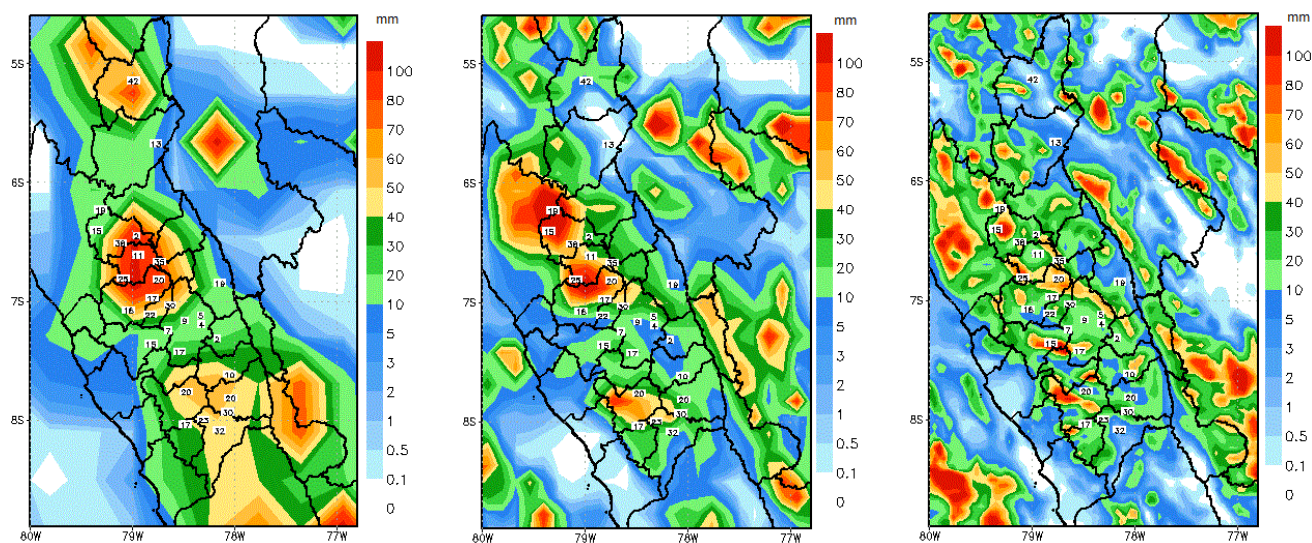




Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 14/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.

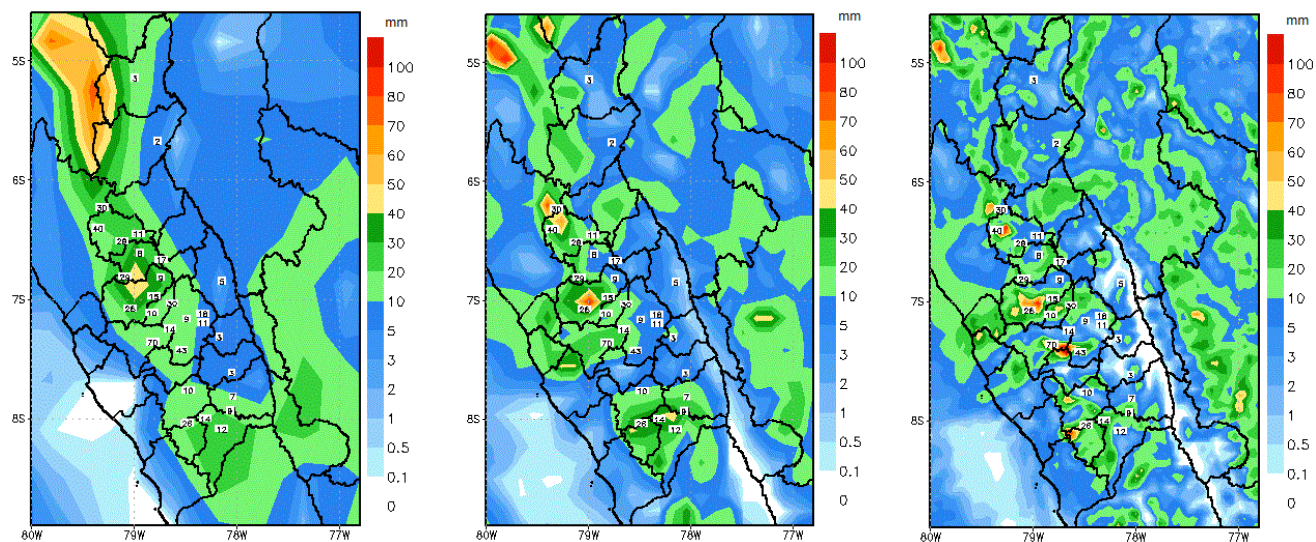


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 14/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.

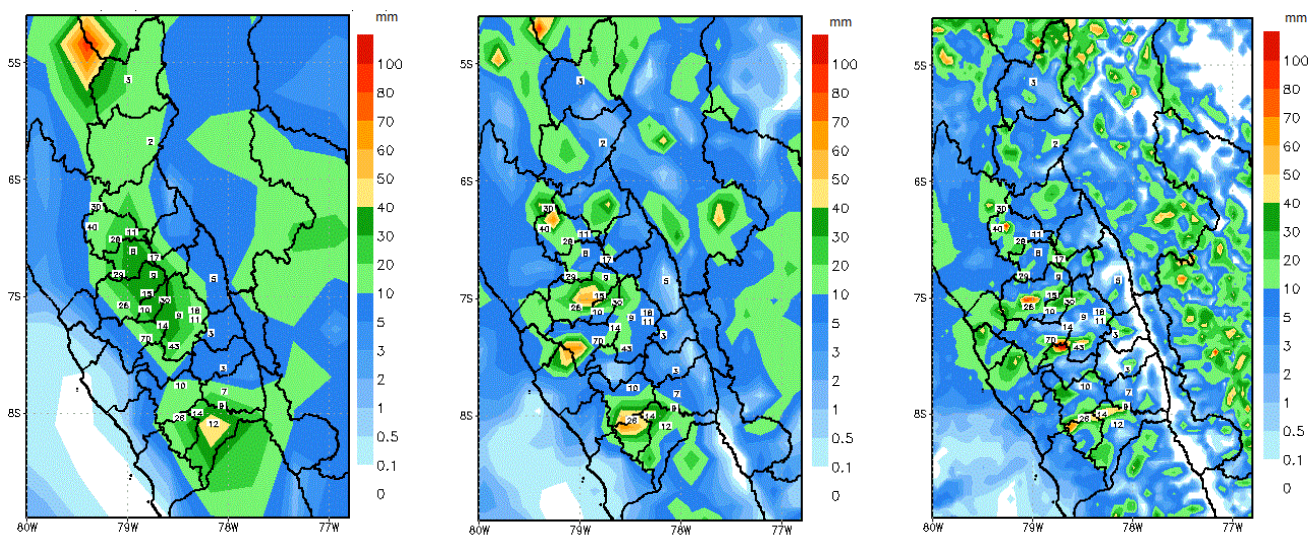


Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 14/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.

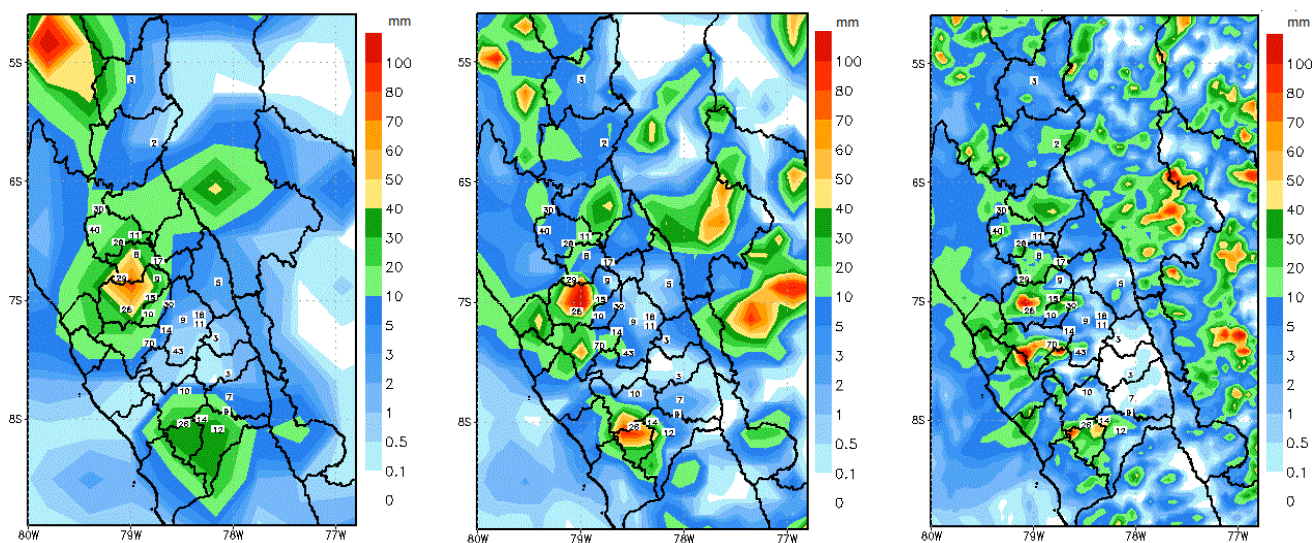




Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 31/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Grell G3.



Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 31/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Parametrizaciones usadas microfísica de nubes WSM6 y convección Kain-Fritsch.



Precipitación simulada para el evento ocurrido el día 31/03/2017. Precipitación acumulada para 24 horas (mm). De izquierda a derecha, dominios con paso de malla 45 km, 15 km y 5 km. Se desactivó la opción de la parametrización de la convección.